

Messtechnische Untersuchung von Rohranlegethermometern

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. Michael Pufke
geboren am 08.09.1985 in Arnstadt

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich, TU Ilmenau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olfa Kanoun, TU Chemnitz
Dr. rer. nat. Steffen Rudtsch, PTB Berlin

Eingereicht am: 12.11.2018
Verteidigt am: 10.07.2019

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000255

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau im Rahmen eines Kooperationsprojektes.

Zum Gelingen haben einige Personen besonders beigetragen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich danke ich hierbei für die wissenschaftliche Betreuung, die zahlreichen Anregungen und die Ermöglichung, diese Arbeit anfertigen zu können.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olfa Kanoun und Herrn Dr. rer. nat. Steffen Rudtsch danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Weiterhin gilt mein Dank der gesamten Forschungsgruppe Temperatur für das sehr kollegiale Umfeld und die stetige Hilfsbereitschaft.

Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Marc Schalles für die zielführenden Diskussionen, fachlichen Ratschläge und den ein oder anderen Hinweis.

Herrn Dipl.-Ing. Helge Mammen gebührt weiterhin mein Dank für die Durchführung von Vergleichskalibrierungen.

Frau Dipl.-Lehrerin Elke Pietge danke ich für das gewissenhafte Korrekturlesen des Manuskripts.

Ein herzlicher Dank für ihre Unterstützung, Geduld und Ermutigungen gehen an Susanne, Konrad und Jonas sowie meine Eltern Sigrid und Dietmar.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der messtechnischen Untersuchung von Rohranlegethermometern, welche eine spezielle Bauform der an Oberflächen messenden Berührungsthermometer darstellen. Ihre Befestigung an ein Rohrstück erfolgt dabei i. d. R. durch lösbare Montage. Ziel der Messung mittels Rohranlegethermometern ist i. A. die Bestimmung der Mediumtemperatur im Inneren eines durchströmten Rohres.

Bislang existieren nur wenige Veröffentlichungen, Normen und Richtlinien, die Herangehensweisen zur messtechnischen Charakterisierung und Vergleich von Rohranlegethermometern beschreiben.

An Hand theoretischer Betrachtungen von verschiedenen Einflussgrößen, wie Strömungsgeschwindigkeit, Rohrgeometrie, Umgebungsbedingungen etc. wird deutlich, dass diese häufig in Wechselwirkung treten und nur zusammen betrachtet werden sollten.

Um die Einflussgrößen auf die Messung mittels Rohranlegethermometern besser ergründen zu können, wurde ein neuer Prüfstand auf Basis von Sattedampf konzipiert, aufgebaut und erfolgreich verifiziert. Es wurde zudem nachgewiesen, dass mit einem auf Wasser basierenden Prüfstand reproduzierbare Messungen über einen weiten Mediumtemperaturbereich durchgeführt werden können.

Mit Hilfe von kommerziell erhältlichen Rohranlegethermometern erfolgten experimentelle Untersuchungen praxisrelevanter Einflussgrößen. Wesentliche Einflussgrößen konnten neben der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums u. a. in der Reproduzierbarkeit durch die Montage, dem thermischen Kontaktwiderstand zwischen Rohr und Thermometer sowie einer erzwungenen Konvektion in der Umgebung gefunden werden. Mittels Isolierung von Rohr und Thermometer konnte z. T. eine Reduzierung von Einflussgrößen auf die Messung erreicht werden.

Insgesamt zeigt sich, dass bei der Messung von Rohranlegethermometern eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Medium, Rohr, Thermometer mit Kontaktwiderstand und Umgebung, erforderlich ist.

Aus den durchgeführten experimentellen Untersuchungen heraus folgen Empfehlungen zur Ermittlung wichtiger charakterisierender Kenngrößen von Rohranlegethermometern unter reproduzierbaren Bedingungen.

Zusammenfassend wird dem Leser somit die Möglichkeit gegeben, Rohranlegethermometer besser verstehen, bewerten, auswählen und anwenden zu können. Des Weiteren wurde der Grundstein für zukünftige Normen- und Richtlinien gelegt.

Abstract

The present work is dedicated to the metrological investigation of pipe clamp thermometers, which represent a special design of contact thermometers measuring on surfaces. They are usually attached to a pipe section by detachable mounting. The aim of measurement using pipe clamp thermometers is generally to determine the temperature of the medium inside a pipe through which fluid flows.

So far, there are only a few publications, standards and guidelines that describe approaches for the metrological characterization and comparison of pipe clamp thermometers.

By means of theoretical considerations of different influencing quantities, such as flow velocity, pipe geometry, environmental conditions and so forth, it becomes clear that they often interact and should only be considered together.

In order of creating a better understanding of the influencing quantities on the measurement using pipe clamp thermometers, a new measurement setup based on saturated vapor was designed, built and successfully verified. It had also been proven that a water-based setup can be used for reproducible measurements over a wide medium temperature range.

With the help of commercially available pipe clamp thermometers, experimental investigations of practice-relevant influencing quantities were carried out. Beside to the medium flow velocity, important influencing factors could be found in reproducibility through mounting, thermal contact resistance between pipe and thermometer as well as forced convection in the environment. By insulating of pipe and thermometer, it was possible to achieve a partial reduction of influencing quantities.

As an important result it can be stated that an accurate knowledge of the properties of the overall system, consisting of medium, pipe, thermometer with contact resistance and environment, is required for measuring pipe clamp thermometers.

Based on the experimental investigations, recommendations are given for determining important characteristic variables of pipe clamp thermometers under reproducible conditions.

In summary, the reader is given the opportunity for a better understanding, evaluation, selection and application of pipe clamp thermometers. In addition, the foundation stone was laid for future work on standards and guidelines.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen und Stand der Technik.....	2
2.1 Temperaturmessung an Rohroberflächen.....	2
2.1.1 Überblick, Bauformen und Eigenschaften von Rohranlege-thermometern.....	2
2.1.2 Thermisches Ersatzschaltbild und Einflussgrößen.....	4
2.1.3 Anforderungen aus Normen und Richtlinien.....	10
2.2 Theoretische Betrachtungen typischer Einflussgrößen	13
2.2.1 Herangehensweise zur Berechnung	13
2.2.2 Medium sowie dessen Strömungsgeschwindigkeit.....	15
2.2.3 Rohrdurchmesser und Rohrwanddicke	18
2.2.4 Rohrmaterial sowie dessen Emissionsgrad.....	19
2.2.5 Freie und erzwungene Konvektion sowie Rohrlage	21
2.2.6 Rohrisolierung	23
2.2.7 Kontaktwiderstand	25
2.2.8 Umgebungstemperatur und Kopplungsfaktor	26
2.2.9 Zusammenfassung.....	30
2.3 Eignung von Prüfverfahren sowie -einrichtungen	30
2.3.1 Eintauchende Messungen im Thermostat.....	30
2.3.2 Prüfeinrichtung für Oberflächen-Tasttemperaturfühler	31
2.3.3 Messungen am Wasser-Strömungskanal.....	32
2.3.4 Messungen mit Sattdampf als Medium.....	32
2.4 Variantenvergleich und Auswahl eines geeigneten Prüfstandes	33
3. Konzeption und Aufbau des Prüfstandes	35
3.1 Anforderungen	35
3.2 Überblick über den Gesamtaufbau.....	35
3.3 Medienverlauf.....	37
3.3.1 Wasser und Sattdampf	37
3.3.2 Energie und Steuerungssignale	39
3.4 Auswahl und Eigenschaften wesentlicher Einzelkomponenten.....	40
3.4.1 Wasserenthärtungsanlage	40
3.4.2 Dampferzeuger	40
3.4.3 Druckstellventil	41
3.4.4 Zulauf- und Prüfstreckenthermometer	41
3.4.5 Zulauf-Druckmesser	42
3.4.6 Prüfstrecken	42
3.4.7 Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer.....	44
3.4.8 Zulauf- und Prüfstrecken-Kondensatabscheider	44
3.4.9 Druckregler	45
3.4.10 Memographen	45
3.4.11 Lüfter und Lüfterverschiebung.....	46
3.4.12 Klimadatenlogger	46
3.5 Ansteuerungs-, Mess- und Auswertemöglichkeiten	47
4. Verifizierung des Prüfstandes	48
4.1 Allgemeine Betrachtungen	48
4.1.1 Reglerparametrisierung	48

4.1.2	Kurzzeitstabilität	48
4.1.3	Einfluss der Umgebungstemperatur und Langzeitstabilität.....	51
4.1.4	Störungen durch Luftströmungen im Raum.....	52
4.2	Prüfstreckenrohre	53
4.2.1	Oberflächenrauigkeit	53
4.2.2	Mediumstemperatur entlang der Rohrachse.....	55
4.2.3	Umgebungstemperatur im direkten Rohrumfeld	56
4.2.4	Erzielbare Strömungsgeschwindigkeiten des Lüfters.....	58
5.	Messunsicherheitsbetrachtungen.....	60
5.1	Überblick.....	60
5.2	Einzelkomponenten	62
5.2.1	Einsatz- und Umgebungsbedingungen	62
5.2.2	Anzeigewert der Memographen.....	64
5.2.3	Korrektur durch Vergleichskalibrierungen.....	65
5.2.4	Korrektur der Memographen	69
5.3	Gesamtmessunsicherheit und Bewertung.....	71
6.	Erprobung und Vergleich verschiedener Rohranlegethermometer	72
6.1	Überblick der untersuchten Rohranlegethermometer.....	72
6.2	Korrektur der Sensorkennlinie	73
6.3	Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage.....	74
6.4	Messabweichung von der Mediumstemperatur.....	77
6.5	Einfluss von erzwungener Konvektion	81
6.6	Einfluss von Isolierung.....	83
6.7	Weitere Einfluss- und Störgrößen.....	88
6.7.1	Umgebungstemperaturänderungen	88
6.7.2	Kontaktwiderstand.....	90
6.7.3	Hysterese.....	92
6.7.4	Parasitäre Thermospannungen	93
6.8	Messungen und Vergleich mit Wasser-Strömungskanal	94
6.8.1	Aufbau des verwendeten Wasser-Strömungskanals.....	94
6.8.2	Einfluss der Wasser-Strömungsgeschwindigkeit.....	96
6.8.3	Vergleich mit Messungen am Sattedampf-Prüfstand.....	100
6.9	Zusammenfassung	103
7.	Empfehlungen zur Messung und Charakterisierung.....	105
7.1	Allgemeine Hinweise	105
7.2	Herstellerangaben.....	105
7.3	Kenngrößen.....	106
7.4	Empfohlene Messbedingungen und -einrichtungen.....	106
7.5	Durchführung der Messungen	107
8.	Zusammenfassung und Ausblick	109
	Literaturverzeichnis.....	111
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	119
	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	126
	Anhang	135

1. Einleitung

Die Temperaturmesstechnik ist ein häufig verkanntes und unterschätztes Gebiet der Messtechnik, in der vermeintlich alles bekannt zu sein scheint und wenig Neues zu erwarten ist. Bei näherer Betrachtung ergeben sich jedoch Wissenslücken in der Literatur.

Dies spart auch nicht die Anwendung von sogenannten Rohranlegethermometern als eine Bauform der an Oberflächen messenden Berührungsthermometer aus. Eine Ankopplung des Rohranlegethermometers erfolgt dabei i. d. R. durch lösbare Montage am Rohrstück einer Verrohrung. Ziel der Messung mittels Rohranlegethermometern ist i. A. die Bestimmung der Mediumtemperatur im Inneren eines durchströmten Rohres. Vorteilhaft wirkt sich die äußere Montage eines Rohranlegethermometers auf das Fluid aus, da keine nennenswerte Rückwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit bzw. auf deren -profil erfolgt und kein Eingriff in die Rohrleitung, durch z. B. eine Einschraubstelle nötig ist. Wenngleich millionenfach in bspw. Heizungs- und Kälteanlagen, aber auch in der Pharmazie- und Lebensmittelindustrie eingesetzt, sind nur wenige Veröffentlichungen zur Charakterisierung und Vergleich von Rohranlegethermometern bekannt. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl an Unklarheiten für den Anwender, insbesondere mit welchen Messabweichungen zwischen Sensortemperatur des Rohranlegethermometers und der Mediumtemperatur unter verschiedenen Einsatz- und Umgebungsbedingungen zu rechnen sind.

Die zur Kalibrierung angewandten Normen und Richtlinien im Bereich der Temperaturmesstechnik helfen hierbei nur sehr bedingt weiter, da wesentliche in Erscheinung tretende Einflüsse auf das Messergebnis bei Anwendung von Rohranlegethermometern nicht berücksichtigt werden. Als ebenfalls problematisch erweisen sich zudem die Angaben der Hersteller von Rohranlegethermometern, welche häufig nur spärliche Angaben zu den messtechnischen Eigenschaften ohne Erläuterungen der Messbedingungen enthalten. Ein Vergleich und Auswahl anhand von Datenblattangaben unterschiedlicher Rohranlegethermometer ist somit für deren Anwender gegenwärtig nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit möchte daher die Grundlage schaffen, um Rohranlegethermometer besser hinsichtlich ihrer messtechnischen Eigenschaften beschreiben und miteinander vergleichen zu können. Ein besonderer Fokus soll hierbei auf die erzielbaren Messabweichungen unter verschiedenen Einflussgrößen gelegt werden. Hierzu werden ausgehend von theoretischen Betrachtungen wesentliche Einflussgrößen herausgearbeitet und experimentell untersucht. Basierend auf den aus der Literatur bekannten Prüfverfahren wird ein neuer optimierter Prüfstand konzipiert, aufgebaut und seine Anwendbarkeit verifiziert. Anhand dieses Prüfstandes werden weiterhin Messungen von mehreren, kommerziell erhältlichen, Rohranlegethermometern unterschiedlicher Bauart vorgenommen und bewertet. Zudem erfolgt ein Vergleich zu einem bisherig verwendeten Prüfstand, so dass eine Aussage über einen weiten Einsatztemperaturbereich getroffen werden kann.

Am Ende der Arbeit sollen Empfehlungen zur messtechnischen Beschreibung und Bestimmung wichtiger charakterisierender Größen von Rohranlegethermometern unter reproduzierbaren Bedingungen gegeben werden. Abschließend soll so dem Leser die Möglichkeit eröffnet werden Rohranlegethermometer besser verstehen, bewerten, auswählen und anwenden zu können und bei Bedarf selbst mit Hilfe einer Prüfeinrichtung zu untersuchen. Des Weiteren soll zur Thematik der Grundstein für zukünftige Normen- und Richtlinienarbeiten gelegt werden.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Ausgehend von einer Übersicht über industriell eingesetzte Rohranlegethermometer und ihrer Messprinzipien sowie Einflussfaktoren auf das Messergebnis werden in diesem Kapitel bisherige Herangehensweisen zur Messung von Rohranlegethermometern sowie deren Probleme erörtert und somit eine Motivation für die vorliegende Arbeit geschaffen.

2.1 Temperaturmessung an Rohroberflächen

2.1.1 Überblick, Bauformen und Eigenschaften von Rohranlegethermometern

Eine Einordnung von Rohranlegethermometern kann zunächst in die Gruppe der Berührungsthermometer zur Messung an Festkörpern vorgenommen werden. Sie stellen dabei eine spezielle Bauart innerhalb der Oberflächen-Temperaturfühler dar. I. d. R. steht jedoch nicht die Messung der Rohraußenwandtemperatur im Vordergrund, sondern vielmehr die Ermittlung der Mediumstemperatur im Inneren eines Rohrstückes.

Durch die äußere Ankopplung des Fühlers an das Rohr werden sowohl Strömungsgeschwindigkeit als auch Strömungsprofil im Rohr nicht beeinflusst. Rohranlegethermometer können somit in diesen beiden Punkten als thermisch rückwirkungsfrei angesehen werden. Insbesondere bei kleinen Rohrdurchmessern kann ein Einsatz von Rohranlegethermometern schon wegen der geometrischen Verhältnisse vorteilhaft im Vergleich zu eintauchenden Fühlern sein. Weiterhin folgt durch die äußere Anbringung eine hygienisch sauberere Lösung für das Medium. Auch können Rohranlegethermometer relativ einfach auch in bestehende Anlagen eingesetzt und ohne Unterbrechung des Anlagenprozesses angebaut, ausgetauscht und kalibriert werden.

Rohranlegethermometer besitzen jedoch bauartbedingt den Nachteil einer fehlerbehafteten Erfassung der im Inneren des Rohres herrschenden Mediumstemperatur, da die Messung nicht direkt im Medium vollzogen wird. Ihr Einsatzgebiet findet sich vorwiegend in der Lebensmittel-, Pharmazie- und Chemieindustrie sowie Haustechnik. Durch Recherche und Anfrage bei verschiedenen Herstellern, vorrangig im deutschsprachigen Raum, ergibt sich eine Übersicht mit charakteristischen Eigenschaften von ausgewählten Rohranlegethermometern (s. Tab. A23). Aus der Tab. A23 ist ersichtlich, dass diese häufig bei kleinen Rohrquerschnitten und Temperaturen bis ca. 150 °C (vgl. [1]) zur Anwendung kommen. Der maximal typische Einsatzbereich erstreckt sich jedoch bis zu ca. 300 mm Rohrdurchmesser sowie ca. 400 °C.

Abb. 2.1 stellt verschiedene kommerziell erhältliche Bauformen exemplarisch dar. Schon daraus ist ersichtlich, dass es eine Vielzahl von Rohranlegethermometern unterschiedlichsten Aufbaus gibt. Aus Sichtweise der Befestigung am Rohr können im Wesentlichen 3 Gruppen von Rohranlegethermometern unterschieden werden (mit ausgewählten Ergebnissen einer Patent- und Gebrauchsmusterrecherche):

- Thermometer mit Befestigungsmöglichkeit durch Spannbänder bzw. Kabelbinder oder mit bereits am Spannband befestigten Sensorelement (z. B.: [2-17])
- Halbschalensysteme, die gegeneinander am Rohr mechanisch verspannt werden, häufig mit Anpassung an den Rohrdurchmesser sowie z. T. herausnehmbarem Temperaturfühler (z. B.: [18-24])

- Klemmsysteme, welche ohne Werkzeug direkt auf das Rohr angeklemmt werden (z. B.: [25-33])

Neben Vorgenannten gibt es noch weitere Bauformen (z. B.: [34-42]) sowie eine große Bandbreite von Bauartvarianten innerhalb und zwischen den einzelnen Gruppierungen (z. B. [43, 44]). Auf Thermometer, welche unlösbar auf einem Rohrstück angebracht sind (vgl. [45, 46]) und damit in eine Verrohrung eingeschraubt oder eingeschweißt werden, soll in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden, da diese eine spezielle Sonderbauform darstellen.



Abb. 2.1: Unterschiedliche Bauformen von Rohranlegethermometern mit Ankopplung an ein DN 21,3-Rohr, v. l. n. r. (Hersteller/Typ): Befestigungsmöglichkeit mit Spannband (Claus RFP-100 S), Halbschalen (Emerson 0085) sowie Klemmbügel (Testo 0602 4592)

Neben verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten an die Rohrstrecke kommen ebenso unterschiedliche Temperatursensoren zum Einsatz, welche sich von Metall-Messwiderständen über Thermoelemente bis hin zu Thermistoren erstrecken.

Aus der in Tab. A23 dargelegten Recherche geht zudem hervor, dass bei den meisten Herstellern bzw. Typen keine Angaben über die erzielbaren Messabweichungen von der Mediumtemperatur existieren oder die Genauigkeitsklasse nach DIN EN 60751 (vgl. [47]) des verwendeten Temperatursensors herangezogen wird. Von den insgesamt 34 betrachteten Herstellern gaben nur 7 entsprechende Werte an, wobei auf die Messbedingungen i. d. R. nicht eingegangen wird. Für den Anwender ergibt sich somit ein unbefriedigendes Bild mit welchen statisch-thermischen Messabweichungen sowie Messunsicherheiten im realen Einsatzfall tatsächlich zu rechnen ist. Die vorliegende Arbeit will sich daher einer Untersuchung von kommerziell erhältlichen Rohranlegethermometern widmen, um nähergehende Aussagen zu den tatsächlichen Messabweichungen sowie Einflussfaktoren auf eine Messung mit Rohranlegethermometern treffen zu können.

2.1.2 Thermisches Ersatzschaltbild und Einflussgrößen

Da die Messung der Mediumtemperatur im Inneren eines Rohres mit Hilfe eines Rohranlegethermometers nicht direkt erfolgen kann, ist zunächst eine Betrachtung der Rohraußenwandtemperatur nötig. Diese ist durch die Messbedingungen, wie bspw. Strömungsgeschwindigkeit des Mediums oder Konvektion in der Umgebung, vielfältigen Einflussgrößen und somit auch Abweichungen unterworfen. Um Letztgenannte theoretisch beschreiben zu können, wird hierzu ein vereinfachtes elektrothermisches Analogiemodell eingeführt. Dabei erfolgt eine physikalische Beschreibung der Wärmetransportvorgänge durch den Wärmestromverlauf \dot{Q} vom Medium im Inneren des Rohres über die Rohrwand hin zur Umgebung anhand der dabei auftretenden thermischen Widerstände R . Letztgenannte stellen dabei die Einflussgrößen dar und werden im Folgenden nähergehend beschrieben. Abb. 2.2 links stellt das thermische Ersatzschaltbild ohne Anbringung eines Rohranlegethermometers dar, wodurch sich eine ungestörte Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} ergibt.

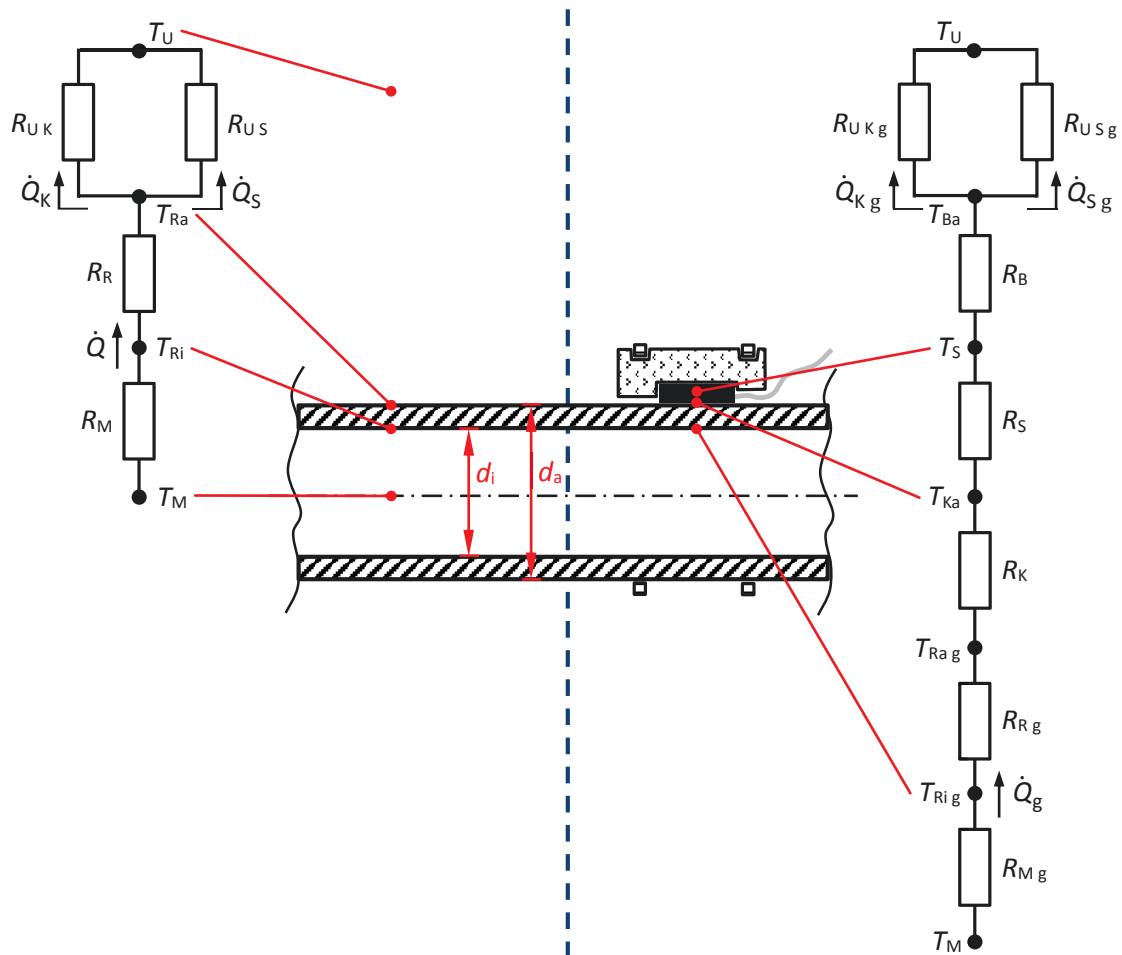


Abb. 2.2: Thermisches Ersatzschaltbild für eine ungestörte (links) und durch ein Rohranlegethermometer gestörte (rechts) Rohraußenwandtemperatur an einem durchströmten Rohrstück bei Betrachtung des Wärmestromverlaufs in radialer Richtung

Das Schema gilt nur unter folgenden vereinfachten Annahmen:

- Rohr mit kreisrundem Querschnitt
- stationäre Wärmetransportvorgänge
- konstante Temperatur auf der Rohrachse (Mediumtemperatur T_M)

- kein Wärmestrom in axialer Rohrrichtung
- gleiche Strömungsgeschwindigkeit und -profil des Mediums
- konstante Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
- entlang der Rohraußenwand konstante Konvektion und Wärmestrahlung
- stationäre Umgebungstemperatur T_U

In Anlehnung an [48] beeinflusst die Messung mittels eines Rohranlegethermometers auch die Messstelle selbst. Somit muss das thermische Ersatzschaltbild durch weitere thermische Widerstände erweitert werden, siehe Abb. 2.2 rechts. Die Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} kann dabei als durch das Rohranlegethermometer gestörte Temperatur angesehen werden.

Für weitergehende Betrachtungen sei auf die einschlägige Literatur [48-51] verwiesen.

Im zunächst betrachteten ungestörten Fall (s. Abb. 2.2 links) geht der Wärmestrom \dot{Q} ausgehend von der Temperaturdifferenz zwischen Mediumtemperatur T_M und Rohrrinnenwandtemperatur T_{Ri} durch den Wärmeübergangswiderstand R_M . Der Wärmeübergangswiderstand R_M ist dabei abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen Medium und Rohrrinnenwand, welcher wiederum wesentlich von den stofflichen Eigenschaften des Mediums (z. B. Dichte, Viskosität, Temperatur), der Strömungsgeschwindigkeit und dem sich ausbildenden Strömungsprofil beeinflusst ist. Der Wärmeübergangswiderstand R_M lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$R_M = \frac{\Delta T_M}{\dot{Q}} = \frac{T_M - T_{Ri}}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha_i \cdot A_i} \quad (2.1)$$

Die Rohrrinnenwandfläche A_i ist hierbei vom Innenradius r_i bzw. Innendurchmesser d_i des Rohres abhängig. Durch Umstellung ergibt sich der Wärmestrom \dot{Q} bei einer Rohrlänge l :

$$\dot{Q} = \alpha_i \cdot A_i \cdot (T_M - T_{Ri}) = \alpha_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot l \cdot (T_M - T_{Ri}) = \alpha_i \cdot \pi \cdot d_i \cdot l \cdot (T_M - T_{Ri}) \quad (2.2)$$

Dem Wärmestromverlauf \dot{Q} weitergehend folgt der Wärmeleitwiderstand R_R der Rohrwand, welcher neben den geometrischen Abmessungen durch die Wärmeleitfähigkeit λ_R des Materials der Rohrwandung definiert ist. Es gilt mit der Rohrrinnenwandtemperatur T_{Ri} und der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} :

$$R_R = \frac{\Delta T_R}{\dot{Q}} = \frac{T_{Ri} - T_{Ra}}{\dot{Q}} \quad (2.3)$$

Mit der vom Radius r abhängigen Zylinder- bzw. Rohrfläche A bestimmt sich hierbei der Wärmestrom \dot{Q} anhand der Wärmestromdichte \dot{q} (Fouriersches Gesetz) sowie der Wärmeleitfähigkeit λ_R der Rohrwand zu:

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} \, dA = \int_A -\lambda_R \cdot \text{grad } T \, dA \quad (2.4)$$

Im eindimensionalen Fall gilt:

$$\dot{Q} = \int_A -\lambda_R \cdot \frac{dT}{dr} \, dA = -\lambda_R \cdot A(r) \cdot \frac{dT}{dr} = -\lambda_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2.5)$$

Nach Variablenseparation von dT und dr folgt für den Wärmestrom \dot{Q} :

$$\dot{Q} = \lambda_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \int_{T_{Ra}}^{T_{Ri}} dT \cdot \int r \frac{1}{dr} = \lambda_R \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot (T_{Ri} - T_{Ra}) = \lambda_R \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \cdot (T_{Ri} - T_{Ra}) \quad (2.6)$$

Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_R der Rohrwand muss der Wärmestrom auf eine Austauschfläche bezogen werden. Gemäß [51, S. 25] findet hierzu die Rohraußenwandfläche A_{Ra} Anwendung. Durch Erweiterung des Zählers und Nenners der Gl. (2.6) mit dem Rohraußendurchmesser d_a bestimmt sich der Wärmestrom \dot{Q} zu:

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \lambda_R}{d_a \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \cdot \pi \cdot d_a \cdot l \cdot (T_{Ri} - T_{Ra}) = \alpha_R \cdot \pi \cdot d_a \cdot l \cdot (T_{Ri} - T_{Ra}) \quad (2.7)$$

Somit ist der Wärmeübergangskoeffizient α_R der Rohrwand:

$$\alpha_R = \frac{2 \cdot \lambda_R}{d_a \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \quad (2.8)$$

Am Übergang zwischen Rohraußenwand und Umgebung teilt sich der Wärmestrom \dot{Q} in einen konvektiven Wärmestromanteil \dot{Q}_K sowie einen Wärmestromanteil \dot{Q}_S durch Wärmestrahlung auf.

Für den ersten Fall folgt mit Hilfe der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} sowie einer stationären Umgebungstemperatur T_U für den Wärmeübergangswiderstand $R_{U\ K}$ durch Konvektion zur Umgebung:

$$R_{U\ K} = \frac{\Delta T_U}{\dot{Q}_K} = \frac{T_{Ra} - T_U}{\dot{Q}_K} \quad (2.9)$$

In Analogie zu vorstehenden Betrachtungen kann der, auf die Rohraußenwandfläche A_{Ra} bezogene, konvektive Wärmestrom \dot{Q}_K an die Umgebung wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_K = \alpha_a \cdot A_{Ra} \cdot (T_{Ra} - T_U) = \alpha_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l \cdot (T_{Ra} - T_U) \quad (2.10)$$

Hierbei ist α_a der äußere Wärmeübergangskoeffizient, welcher maßgeblich durch freie oder erzwungene Konvektion in der Umgebung, Rohrlage sowie temperaturabhängige thermophysikalische Stoffeigenschaften definiert wird. Üblicherweise werden Rohranlegethermometer nur in Luft als rohrumgebendes Medium angewandt, so dass sich die weiteren Betrachtungen ausschließlich darauf beziehen.

Zur Ermittlung des Wärmestromanteils \dot{Q}_S durch Wärmestrahlung wird zunächst ein schwarzer Strahler betrachtet, welcher definitionsgemäß alle im infraroten Wellenlängenbereich auftreffenden elektromagnetischen Strahlen absorbiert. Für dessen schwarze Strahlung gilt mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes die spektralspezifische Strahldichte $i_{\lambda\ s}$ [51, Gl. 7.3]:

$$i_{\lambda\ P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \cdot (e^{c \cdot h / (k \cdot \lambda \cdot T_P^*)} - 1)} \quad (2.11)$$

Neben der Wellenlänge λ und der Temperatur T_P^* (* entspricht Angabe in K) des schwarzen Strahlers ist vorstehende Gl. (2.11) nur von den Konstanten Lichtgeschwindigkeit c , Plancksches Wirkungsquantum h und Boltzmannkonstante k abhängig.

Für die von einem schwarzen Strahler ausgehende Wärmestromdichte \dot{q}_P kann durch Integration über den gesamten Wellenlängenbereich folgende Gleichung aufgestellt werden [51, Gl. 7.6]:

$$\dot{q}_P = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda P} d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h^4 \cdot c^2} \cdot T_P^{*4} = \sigma \cdot T_P^{*4} \quad (2.12)$$

Dabei kennzeichnet σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, gemäß [52] beträgt deren Wert:

$$\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad (2.13)$$

Unter Berücksichtigung des Emissionsgrades ε_{Ra} der Oberfläche der Rohraußenwand lässt sich die Wärmestromdichte \dot{q}_{Ra} bei Strahlung der Rohroberfläche an die Umgebung wie folgt bestimmen:

$$\dot{q}_{Ra} = \varepsilon_{Ra} \cdot \dot{q}_P = \varepsilon_{Ra} \cdot \sigma \cdot T_P^{*4} = \varepsilon_{Ra} \cdot \sigma \cdot T_{Ra}^{*4} \quad (2.14)$$

Da die Oberfläche der Rohraußenwand A_{Ra} mit der Temperatur T_{Ra}^* sowohl Strahlung emittiert als auch Strahlung von einer Fläche A_U in der Umgebung mit der Temperatur T_U^* reflektiert muss diese Wechselwirkung zudem berücksichtigt werden. Bei ausschließlichem Strahlungsaustausch zwischen den Flächen A_{Ra} und A_U ergibt sich aus der Differenz der Wärmeströme der Rohraußenwand \dot{Q}_{Ra} und der Umgebung \dot{Q}_U der Wärmestrom \dot{Q}_S :

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{Ra} - \dot{Q}_U = \int_A \dot{q}_{Ra} dA - \int_A \dot{q}_U dA = \varepsilon_{Ra} \cdot \sigma \cdot T_{Ra}^{*4} \cdot A_{Ra} - \varepsilon_U \cdot \sigma \cdot T_U^{*4} \cdot A_U \quad (2.15)$$

Durch Betrachtung der Oberfläche A_{Ra} als vollständig von der Fläche A_U umschlossene Fläche und weitere Umformungen (s. [53, S. 53]) folgt [51, Gl. 7.19/7.24]:

$$\dot{Q}_S = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{Ra}} + \frac{A_{Ra}}{A_U} \left(\frac{1}{\varepsilon_U} - 1 \right)} \cdot A_{Ra} \cdot (T_{Ra}^{*4} - T_U^{*4}) \quad (2.16)$$

Unter Annahme einer gegenüber A_{Ra} sehr großen Fläche A_U gilt näherungsweise:

$$\dot{Q}_S = \varepsilon_{Ra} \cdot \sigma \cdot A_{Ra} \cdot (T_{Ra}^{*4} - T_U^{*4}) \quad (2.17)$$

Der Wärmestrom \dot{Q}_S durch Strahlung an die Umgebung ist somit wesentlich durch den Emissionsgrad ε_{Ra} der Oberfläche der Rohraußenwand bestimmt. In der Praxis ist der Emissionsgrad ε_{Ra} i. d. R. unbekannt und führt damit zu großen Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wärmestroms \dot{Q}_S . Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass dieser selbst sowohl von der Temperatur als auch vom Wellenlängenbereich abhängig ist. Befinden sich zudem weitere emittierende Flächen, wie bspw. Heizungsanlagen, in der unmittelbaren Umgebung, so wirkt sich deren Emissionsgrad und die Ausrichtung der Flächen zueinander aus. Die Anwendbarkeit der vereinfachten Gl. (2.17) ist dann nicht mehr gegeben.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen kann nunmehr bei Kenntnis der einzelnen Parameter der gesamte radiale Wärmestrom \dot{Q} vom Medium zur Umgebung eines durch ein Rohranlegethermometer ungestörten Rohrabschnitts ermittelt werden. Das Modell kann zudem mit weiteren thermischen Widerständen, wie bspw. dem thermischen Widerstand R_{iso} einer Isolierschicht um das Rohr, beliebig erweitert werden. Wie aus den Gleichungen zu erkennen ist, wirkt sich neben der Temperaturdifferenz zwischen Medium und

Umgebung jeder einzelne thermische Widerstand bzw. Wärmetransportvorgang auf den sich ausprägenden Wärmestrom \dot{Q} aus. Da, wie noch gezeigt werden soll, die jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten untereinander temperatur- sowie stoffdatenabhängig sind und meist nur die Mediums- und Umgebungstemperatur bekannt sind, ist i. A. nur eine iterative oder numerische Berechnung möglich. Eine gleiche Temperatur von Rohraußenwand und Medium stellt sich nur bei unendlich großen Wärmeübergangskoeffizienten α_i und α_R mit gleichzeitig unendlich kleinem Wärmeübergangskoeffizient zur Umgebung α_a ein, was praktisch nicht möglich ist.

Durch Anbringung eines Rohranlegethermometers an das Rohrstück ändern sich die Wärmetransportvorgänge, so dass das thermische Ersatzschaltbild erweitert werden muss, siehe Abb. 2.1 rechts. Hierzu können weitere Einflussgrößen bzw. thermische Widerstände betrachtet werden, womit ein gestörter Wärmestrom \dot{Q}_g zwischen Medium und Umgebung folgt. Da das Rohranlegethermometer nur die (mittlere) Temperatur T_s seines Sensorelements erfassen kann, wirken sich die thermischen Widerstände unmittelbar auf die Sensortemperatur T_s aus.

So prägt sich zwischen Rohraußenwand und Oberfläche des Temperaturfühlers ein thermischer Kontaktwiderstand R_K aus. Dieser ist dabei u. a. abhängig von der Geometrie der beiden Flächen zueinander sowie deren Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Oberflächenrauigkeit, Oxidation, Verschmutzung). Durch die mechanische Anbringung des Rohranlegethermometers folgen weitere Einflüsse, wie bspw. die Anpresskraft des Temperaturfühlers an das Rohr, Materialpaarung, Duktilität zwischen Temperaturfühler und Rohr etc. Häufig anzutreffen ist zudem die Ausprägung von Luftspalten zwischen Temperaturfühler und Rohr, welche teilweise durch Verwendung von gut wärmeleitendem Kontaktmaterial (z. B. Wärmeleitpaste) vermindert werden kann. Bei deren Verwendung stellen jedoch auch Wärmeleitfähigkeit, Dicke und Ausfüllungsvermögen des Kontaktmaterials nicht zu vernachlässigende Einflussgrößen dar. Vereinfacht kann der Kontaktwiderstand R_K im Modell als rohrumgebende dünne Schicht mit der äußeren Grenzschichttemperatur T_K aufgefasst werden.

An deren Übergang zum Temperaturfühler und weitergehend dem eigentlichen Sensorelement kann der thermische Widerstand R_s betrachtet werden, welcher sich i. A. durch die innere Wärmeleitfähigkeit des Temperaturfühler- bzw. Temperatursensormaterials bestimmt.

Weiterhin stellt der thermische Widerstand R_B das angrenzende Befestigungssystem des Rohranlegethermometers dar. Dieses kann zusammengefasst aus z. B. der Rohrhalterung, Isolierstücken sowie einer Haltevorrichtung des Temperaturfühlers (mit jeweils spezifischen Wärmeleitfähigkeiten bzw. Wärmeübergangskoeffizienten) bestehen. Die in Abb. 2.2 rechts dargestellte Temperatur T_{Ba} stellt die äußere Oberflächentemperatur des Befestigungssystems dar.

An dieser Grenzschicht findet nunmehr der Wärmetransport zur Umgebung durch Konvektion und Wärmestrahlung statt.

Durch die Erweiterung des thermischen Ersatzschaltbildes können die aus dem ungestörten Fall bekannten Wärmeübergangskoeffizienten selbst bei gleichen Mediums- und Umgebungsbedingungen i. A. nicht direkt auf den gestörten Fall übertragen werden. Sie müssen dann neu bestimmt werden.

In Abb. 2.3 ist ein typischer Temperaturverlauf zwischen Medium und Umgebung für den Fall einer ungestörten und gestörten Rohrwandtemperatur dargestellt.

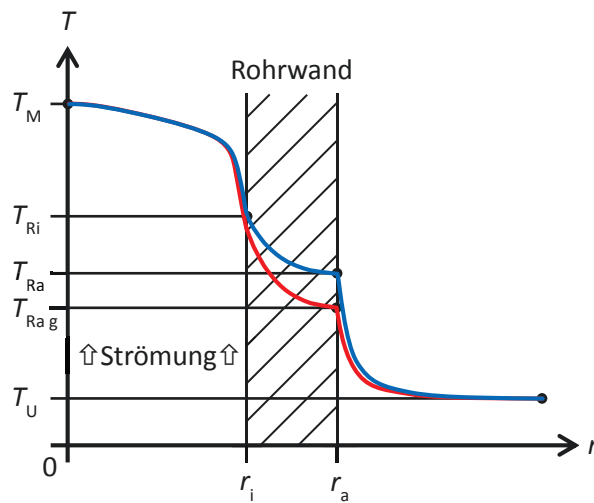


Abb. 2.3: Schematischer Temperaturverlauf für den ungestörten (blau) sowie gestörten (rot) Fall eines mediendurchströmten Rohres

Insgesamt stellt die Berechnung der zu erwartenden Sensortemperatur T_s bei Befestigung eines Rohranlegethermometers an ein Rohrstück eine schwierig berechenbare Aufgabe dar. Während im ungestörten Fall bei einer konstanten Mediumstemperatur auf der Rohrachse der axiale Wärmetransport vernachlässigt werden kann, kann dies für den gestörten Fall i. d. R. nicht erfolgen, da dann durch die Geometrie des Rohranlegethermometers mehrdimensional gerichtete Wärmeströme zu berücksichtigen sind. Für die hierdurch bedingten weiteren Einflussgrößen bietet sich eine numerische Berechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM, prinzipielle Vorgehensweise s. [54]) an. Eine von der Bauform eines Rohranlegethermometers unabhängige allgemeine Berechnung der theoretisch zu erwartenden Sensortemperatur T_s ist somit nicht möglich.

Neben den einzelnen Temperatur-Abweichungen stellt der Kopplungsfaktors B eine wichtige Größe zur Bewertung von Rohranlegethermometern dar. Er ist dabei ein Maß dafür wie sich die Temperaturdifferenz zwischen Sensortemperatur (T_s) des Rohranlegethermometers von der des Mediums (T_M) in Abhängigkeit von einer Temperaturdifferenz zwischen Umgebung (T_U) und Medium (T_M) verhält. Er bestimmt sich zu:

$$B = \frac{|T_s - T_M|}{|T_U - T_M|} = \frac{|\Delta T_{sM}|}{|\Delta T_{UM}|} \quad (2.18)$$

Der Kopplungsfaktor B stellt die relative statisch-thermische Abweichung (siehe [48]) dar, welche die Empfindlichkeit der Abweichung ΔT_{sM} von der Temperaturdifferenz ΔT_{UM} zwischen Medium und Umgebung beschreibt. Er berücksichtigt somit im Gegensatz zur reinen Betrachtung der Abweichung ΔT_{sM} auch Änderungen in der Temperaturdifferenz ΔT_{UM} zwischen Umgebungs- und Mediumstemperatur.

Eine Betrachtung der verschiedenen Einflussgrößen auf die theoretisch zu erwartende Rohraußenwandtemperatur sowie deren Abhängigkeiten untereinander erfolgt in Kap. 2.2.

Neben vorgenannten thermischen Einflussgrößen ergeben sich zusätzliche Abweichungen zwischen Mediums- und Sensortemperatur durch die angekoppelte elektrische Mess-technik des Rohranlegethermometers. Diese sind zusätzlich zu betrachten und in der Gesamtbetrachtung mit zu berücksichtigen.

2.1.3 Anforderungen aus Normen und Richtlinien

Ordnungen, Normen und Richtlinien bilden den Stand der Wissenschaft und Technik in unterschiedlichsten Bereichen detailliert ab. Für die Temperaturmessung ist hierbei ebenso eine Vielzahl von Normen und Richtlinien bekannt. Häufig werden dabei mögliche praktische Anwendungsfälle, Einflussgrößen sowie Messmöglichkeiten zur Bestimmung der charakteristischen Kennwerte einer Temperaturmessung behandelt. In wie weit Rohranlegethermometer dabei Berücksichtigung finden, soll im Folgenden näher analysiert werden.

Wie die Recherche zu Rohranlegethermometern (vgl. Tab. A23) ergibt, wird bei Verwendung von Platin-Messwiderständen für ein Rohranlegethermometer von deren Herstellern vielfach die Norm DIN EN 60751 [47] zur Angabe einer Genauigkeitsklasse verwendet. Die darin enthaltenen Ausführungen zur Bestimmung der Thermometer-Charakteristika beschränken sich dabei jedoch vorrangig auf eintauchende Messungen in einem Fluid (Luft oder Wasser). Eine gesonderte Betrachtung der Temperaturmessung an der Oberfläche eines Festkörpers erfolgt hierbei nicht.

Auch die Richtlinie VDI/VDE 3511-1 [55], welche die „Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmessverfahren“ beinhaltet, behandelt keine Temperaturmessung an der Oberfläche.

Aus der VDI/VDE 3511-2 [56] geht hervor, dass sich zur Temperaturmessung an Oberflächen Schichtmesswiderstände oder Strahlungspyrometer eignen.

Die VDI/VDE 3511-5 [57] gibt einen umfassenderen Einblick in die Messung mit Oberflächentemperaturfühlern. Hierbei wird sich vorrangig auf Thermoelemente beschränkt. Als maßgeblich für die Messabweichungen von Oberflächentemperaturfühlern werden in der Richtlinie folgende Einflüsse mit Empfehlungen zur Verbesserung gegeben [57]:

- Wärmeübergang vom zu messenden Körper auf den Temperaturfühler: Thermometer muss wärmeschlüssig angedrückt oder befestigt werden. U. U. Verbesserung durch Wärmeleitpaste oder Öl, insbesondere bei schlecht wärmeleitenden Stoffen und rauen Oberflächen.
- Messabweichungen durch Strahlungseinflüsse: Temperaturfühler sollte daher möglichst das gleiche Emissionsverhalten wie die zu messende Oberfläche haben.
- Wärmeableitung durch Temperaturfühler: Verminderung durch z. B. dünnrahtige Thermoelemente, welche entlang von Isothermen der zu messenden Oberfläche verlegt sein sollen (Auflagefläche bei gut wärmeleitenden Oberflächen: min. 10 mm bei 1 mm bzw. min. 4 mm bei 0,1 mm Durchmesser der Thermodrähte).

In der Richtlinie werden einige Eingriffe in die Oberfläche durch Auflöten sowie Einstemmen des Temperaturfühlers oder dessen Einbettung in eine Nut zur Verringerung von Messabweichungen beschrieben, welche jedoch für die hier betrachteten Rohranlegethermometer nicht von Interesse sind. Daneben wird das feste Andrücken eines Thermoelements mit einem dünnen angelöteten Metallplättchen empfohlen. Als Messabweichung wird nur diejenige zwischen einem Thermoelement und der Oberflächentemperatur ausgeführt, sie ist dabei mit ca. 1 % des Temperaturunterschiedes zwischen Oberfläche und Umgebung angegeben. Zur Messung der Oberflächentemperatur eines Rohres werden bei kleinen Rohrquerschnitten um das Rohr gewickelte Thermodrähte und bei großen Rohr-

querschnitten die Verklebung oder Drahtbefestigung der Thermodrähte auf der Rohroberfläche in axialer Rohrritung empfohlen. Weiterhin erfolgt die exemplarische Darstellung eines Anlegethermoelements für gewölbte Oberflächen. Weitergehende Informationen zur Thematik eines Rohranlegethermometers finden sich nicht. Durch die alleinige Betrachtung der Oberflächentemperatur ohne Bezug auf die Mediumtemperatur im Rohr und fehlende Angaben zur Bestimmung der Messabweichungen weist die VDI/VDE 3511-5 somit einige Lücken auf.

Eine allgemein gehaltene Definition eines Anlegefühlers findet sich in der VDI/VDE 3512-1 („Temperaturmessung für die Gebäudeautomation - Grundlagen“) [58], welche diesen als Anschlussgehäuse mit einem in einem Anlegeteil integrierten Temperatursensor versteht. Das sogenannte Anlegeteil wird dabei als „V-förmig oder anderweitig formschlüssig zum entsprechenden Anlegenstand ausgebildet“ [58] beschrieben. Weiterhin wird der thermische Kopplungsfaktor B_{rel} eingeführt. Dieser ist identisch mit Gl. (2.18), basiert jedoch auf einem Modell mit eintauchendem Temperaturfühler. Für die in der Richtlinie betrachteten Anlege- und Gehusefhler werden in der VDI/VDE 3512-2 [1] 3 sogenannte Güteklassen nach Tab. 2.1 unterschieden. Zur Einteilung in eine Güteklasse müssen alle Einzelkriterien erfüllt sein.

Tab. 2.1: Güteklassen für Anlege- und Gehusefhler in der Gebäudeautomation, nach [1]

Güteklasse	Toleranz (Klasse gemäß DIN EN 60751) ¹⁾	Kopplungsfaktor B_{rel}	Drift bei einer Einsatzdauer von 3 Jahren, bezogen auf 0 °C
A-TGA	$\pm(0,15 \text{ K} + 0,002 \cdot T) \text{ (A)}$	$< 6 \%$	Betrag $< 0,15 \text{ K}$
B-TGA	$\pm(0,30 \text{ K} + 0,005 \cdot T) \text{ (B)}$	$< 12 \%$	Betrag $< 0,3 \text{ K}$
C-TGA	$\pm(0,60 \text{ K} + 0,010 \cdot T) \text{ (C)}$	$< 20 \%$	Betrag $< 0,6 \text{ K}$
ohne	größer als bei C-TGA		keine Forderungen

¹⁾ In VDI/VDE 3512-2 keine Angaben zur Temperatur T , gemäß DIN EN 60751: Betrag der Temperatur in °C

Die Bestimmung der Drift wird dabei gemäß VDI/VDE 3512-4 [59] als Temperaturänderung des Fühlers bei 0 °C vor und nach einer „Testbelastung“ ermittelt. Diese beinhaltet 10 Temperaturwechsel des Fühlers zwischen dessen Einsatztemperaturgrenzen sowie 1.000 h Temperierung an dessen oberer Einsatztemperaturgrenze. In der VDI/VDE 3512-4 [59] wird zur Bestimmung des Koppelungsfaktors B_{rel} des Fühlers eine Prüfung an einem durchströmten Ringrohrsystem mit montierten Rohranlegefhler vorgegeben. Dabei sollen folgende Eigenschaften eingestellt bzw. gemessen werden [59]:

- Rohrdurchmesser: 40 mm
- Rohrwandstärke: 2 mm
- Rohrmaterial: VA
- Mediumtemperatur T_M im Rohr: $\approx 80 \text{ °C}$
- Strömungsgeschwindigkeit v : 1 m/s
- Messung der Umgebungtemperatur T_U in 200 mm Abstand zur Messstelle
- Bestimmung der Sensortemperatur T_S des Anlegefühlers

Die Bestimmung des Kopplungsfaktors B_{rel} erfolgt somit nur an einem Arbeitspunkt. Laut gleicher Richtlinie ist der für Anlegefühler typische Bereich der Mediumtemperatur in Rohrleitungen von -50 °C bis 150 °C [1] definiert. In Anbetracht dessen, ist somit u. U. fraglich, ob die Bestimmung des Kopplungsfaktors B_{rel} als ausreichend angesehen werden kann. Weiterhin fehlen konkretisierende Angaben zum Medium, Strömungsprofil, Rohrma-

terial sowie Rohroberfläche, so dass eine Vergleichbarkeit verschiedener Prüfstandsaufbauten fraglich erscheint. Durch den Bezug der Prüfbedingungen auf nur einen Rohrdurchmesser können zudem auf andere Rohrdurchmesser angepasste Rohranlegethermometer nicht gemessen und verglichen werden. Durch Umstellung des relativen Kopplungsfaktors B_{rel} nach der Temperaturdifferenz ΔT_{SM} zwischen Sensortemperatur T_{S} und Mediumtemperatur T_{M} folgt:

$$\Delta T_{\text{SM}} = T_{\text{S}} - T_{\text{M}} = B_{\text{rel}} \cdot (T_{\text{U}} - T_{\text{M}}) \quad (2.19)$$

Hierbei stellt die Temperaturdifferenz ΔT_{SM} auch die Messabweichung des Rohranlegethermometers von der Mediumtemperatur dar. Bei einer Umgebungstemperatur T_{U} von 20 °C und der zur Prüfung vorgegebenen Mediumtemperatur T_{M} von 80 °C folgt bspw. für die Güteklasse A-TGA nach VDI/VDE 3512-2 [1] eine einzuhaltende Messabweichung $\Delta T_{\text{SM}} > -3,6$ K und für die Güteklasse C-TGA sogar eine Messabweichung $\Delta T_{\text{SM}} > -12$ K. Besonders letztgenannter Wert wirft die Frage einer dann noch ausreichend genauen Messung der Mediumtemperatur mittels eines Rohranlegethermometers auf.

In der VDI/VDE 3512-3 [60] werden folgende Montagehinweise zur optimierten Messung von Flüssigkeiten in Rohrleitungen mittels Anlegefühlern gegeben [60]:

- blanke Rohroberfläche (kein Rost, keine Farbe)
- dauerhafte großflächige Befestigung des Anlegefühlers
- Benutzung von, über den Temperaturbereich geeigneter, Wärmeleitpaste
- dicke Wärmedämmung des Anlegefühlers und der Rohrleitung auf 30 cm Länge um die Messstelle
- Verlegung der Zuleitung des Anlegefühlers über ca. 30 cm Länge auf dem Rohr entlang einer Isothermen

Aus der VDI/VDE 3522-1 [54] ist die allgemein gehaltene Beschreibung von statischen und dynamischen Messabweichungen bei „Temperaturmessung an und in Festkörpern“ [54] bekannt. Weiterhin wird auf die Einflussgrößen einer gestörten Oberflächentemperaturmessung eingegangen, welche im Wesentlichen in Kap. 2.1.2 ausführlich beschrieben sind. Die Betrachtungen beschränken sich jedoch nur auf eine Messung der Oberflächentemperatur als gesuchte Größe.

In der VDI/VDE 3522-2 [61] werden Messeinrichtungen zur „experimentelle[n] Bestimmung von Zeitprozentkennwerten“ [61] beschrieben. Hierbei wird jedoch nur auf eine Einrichtung für Oberflächen-Tasttemperaturfühler mit ebenen Prüfkörpern verschiedener Materialien eingegangen.

Eine Erfassung der Temperatur zur Bestimmung der Wärmeabgabe der Raumheizflächen mittels sogenannter Heizkostenverteiler ist in DIN EN 834 [62] beschrieben. Dabei werden die in dieser Arbeit betrachteten Untersuchungen von Rohranlegethermometern thematisch nur tangiert. Dennoch finden sich in der Norm einige Ansatzpunkte zur Ausführung von vergleichbaren Messungen. So sind 5 baugleiche Geräte an einer Messeinrichtung mit 4 verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Medium und Umgebung zu prüfen. Zudem wird die Anforderung gestellt, eine reproduzierbare Montage des Heizkostenverteilers nachzuweisen, wobei hierzu die äußeren Oberflächentemperaturen am Gehäuse des Heizkostenverteilers mit den vom Hersteller zu erwartenden Temperaturen verglichen werden sollen.

Ein Ansatzpunkt zur Berücksichtigung von Rohranlegethermometern in Normen bzw. Richtlinien stellt der im September 2017 wieder einberufene VDI/VDE-GMA Fachausschuss 2.52 Berührungsthermometrie dar. Hierzu gibt es zum Stand der vorliegenden Arbeit jedoch keine fertig ausgearbeitete Richtlinie.

Zusammenfassend legt die Recherche der existierenden Normen und Richtlinien damit nahe, dass auf dem Gebiet der Temperaturmessung mittels Rohranlegethermometern konkrete Anforderungen sowie Herangehensweisen zur Ermittlung von charakterisierenden Kennwerten nur ansatzweise vorhanden sind. Eine Vergleichbarkeit von Messungen verschiedener Rohranlegethermometer mit Hilfe von standardisierten Messverfahren und -abläufen erscheint somit gegenwärtig nur bedingt möglich.

2.2 Theoretische Betrachtungen typischer Einflussgrößen

2.2.1 Herangehensweise zur Berechnung

Aus [63] sind bereits erste Berechnungen zur Bestimmung einiger typischer Einflussgrößen bei der Temperaturmessung an Rohroberflächen bekannt. Um einen tiefergehenden Einblick in die unterschiedlichen Einflussgrößen sowie deren Auswirkungen auf die Messung der Mediumtemperatur mittels Rohranlegethermometern zu erlangen wird im Folgenden zunächst der Fall einer ungestörten Messung der Mediumtemperatur theoretisch betrachtet. Mittels verschiedener Parametersätze wird hierbei u. a. die ungestörte Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} berechnet. Der Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ zwischen der Mediumtemperatur T_M und der ungestörten Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} stellt die kleinste erreichbare Abweichung für einen punktförmig messenden Temperatursensor eines thermisch rückwirkungsfrei betrachteten Rohranlegethermometers dar. Praktisch ist dies, wie bereits gezeigt wurde, nicht realisierbar. Die Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ kann bspw. durch thermisch isolierende Materialien des angekoppelten Rohranlegethermometers geringer, aber auch durch z. B. eine große Bauteiloberfläche des Rohranlegethermometers größer werden. Aus diesen Gründen werden weitere, durch das Rohranlegethermometer bedingte Einflussgrößen und deren Wirkungen auf die Rohraußenwandtemperatur ansatzweise betrachtet. So kann z. B. eine thermische Isolierung des Rohres ein Rohranlegethermometer mit gutem thermischen Isolationsvermögen darstellen. Im Folgenden werden wesentliche Einflussgrößen für den ungestörten sowie gestörten Fall variiert sowie gegenseitige Beeinflussungen dargestellt.

Mittels der Gl. aus Kap. 2.1.2 kann zunächst für die Wärmeströme allgemein nachfolgendes Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\dot{Q} = \alpha_i \cdot \pi \cdot d_i \cdot l \cdot (T_M - T_{Ri}) \quad (2.20)$$

$$\dot{Q} = \lambda_R \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right)} \cdot (T_{Ri} - T_{Ra}) \quad (2.21)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_S \quad (2.22)$$

$$\dot{Q}_K = \alpha_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l \cdot (T_{Ra} - T_U) \quad (2.23)$$

$$\dot{Q}_S = \varepsilon_{Ra} \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d_a \cdot l \cdot (T_{Ra}^{*4} - T_U^{*4}) \quad (2.24)$$

Sind als Temperaturen nur die Mediumtemperatur T_M und die Umgebungstemperatur T_U bekannt, so kann dieses Gleichungssystem nicht analytisch nach z. B. der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} aufgelöst werden. Das Gleichungssystem kann jedoch numerisch gelöst werden. Hierfür kommt in dieser Arbeit der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (vgl. [64, 65]) zur Anwendung. Zudem sind die in α_i , λ_R , α_a und ε_{Ra} enthaltenen Material- und Stoffeigenschaften wiederum temperaturabhängig und müssen damit separat berechnet werden. Hierzu wurden die in der Literatur vorhandenen temperaturabhängigen Tabellenwerte bei Bedarf auf Zwischenwerte interpoliert. Die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten α_i sowie α_a und der Wärmeleitfähigkeit λ_R erfolgte auf Basis des VDI-Wärmeatlas [50]. Darin fehlende Angaben wurden weiteren Quellen entnommen. Auf die Bestimmung der Koeffizienten α_i , λ_R , α_a und ε_{Ra} wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Alle Berechnungen beruhen dabei, soweit nicht anders angegeben, auf den Prämissen und Gleichungen aus Kap. 2.1.2 für den ungestörten Fall.

Zur Vereinfachung beschränken sich die Betrachtungen auf ein 1 m langes Rohrstück. Hierbei ist zu beachten, dass die Berechnungen des inneren Wärmeübergangs eines Rohres im VDI-Wärmeatlas [50] auf unterschiedlichen Ein- und Auslauftemperaturen eines Rohrstücks beruhen. Daraus folgt auch ein, in axialer Richtung, längenabhängiger Wärmeübergangskoeffizient α_i zwischen Medium und Rohrrinnenwand, mit Änderungen insbesondere im Einlaufbereich des Rohres. Dies wird hier durch die Verwendung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{\alpha}_i$ (Mittelwert von α_i über der Rohrlänge l) kompensiert.

Rohrdurchmesser im unteren ein- bis zweistelligen mm-Bereich sind von besonderem Interesse zur Anwendung von Rohranlegethermometern, da durch den kleinen Rohrrinnendurchmesser eintauchende Berührungsthermometer häufig nur schwierig einbringbar sind und deren geringe Eintauchtiefe ins Medium zu großen Abweichungen führen kann. Zudem scheidet u. U. die Verwendung von eintauchenden Berührungsthermometer auch durch ihre signifikante Beeinflussung von Durchfluss sowie Strömung bei kleinen Rohrdurchmessern aus. Aus der DIN 11866 [66], welche Rohrleitungssysteme in der Aseptik, Chemie und Pharmazie beschreibt, wurde für die folgenden Betrachtungen ein DN ½"-Rohr ausgewählt, welches einen Innendurchmesser d_i von 9,4 mm, einen Außendurchmesser d_a von 12,7 mm und somit eine Rohrwandstärke d_R von 1,65 mm besitzt.

Als Umgebungstemperatur T_U für die Berechnungen wird ein typischer Wert für eine Raumtemperatur von 20 °C angesetzt. Weiterhin wird für das Medium in der Umgebung trockene Luft bei 1 bar gemäß [50, D2.2. Tab. 1] angenommen. Als Temperaturbezug für die thermophysikalischen Stoffeigenschaften der Luft findet der arithmetische Mittelwert $\bar{T}_{Ra U}$ ($= (T_{Ra} + T_U)/2$) zwischen der Rohraußenwand- und Umgebungstemperatur Anwendung.

Im Nachfolgenden soll ein Überblick über wesentliche Einflussgrößen gegeben werden, welche die Grundlage für den späteren Vergleich mit der Praxis bilden sollen. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnungen große Abweichungen im ein- bis zweistelligen Prozentbereich erwarten lassen, da die Berechnungen auf empirisch ermittelten Formeln basieren. Dies betrifft besonders den Übergangsbereich von der laminaren zur turbulenten Strömung des Mediums.

2.2.2 Medium sowie dessen Strömungsgeschwindigkeit

Zur Betrachtung des Einflusses des Mediums und dessen Strömungsgeschwindigkeit werden verschiedene Medien ausgewählt. Dazu zählen Wasser bzw. Sattedampf, da diese einen großen inneren Wärmeübergangskoeffizient α_i erwarten lassen. Wasser wird dabei sehr häufig im für Rohranlegethermometer interessanten Bereich der Haustechnik, aber auch im Lebensmittelbereich eingesetzt. Sattedampf hingegen findet im industriellen Bereich bei höheren Temperaturen Verwendung. Weiterhin soll Silikonöl (Polydimethylsiloxan) betrachtet werden, da dieses infolge seines breiten Einsatztemperaturbereiches für Temperaturkalibrierlabore (z. B. in Temperierbädern) zum Einsatz kommt. Die thermophysikalischen Stoffdaten können für Wasser bzw. Sattedampf aus [50, D2.1. Tab. 1 - 3] sowie für Silikonöl aus [67] entnommen werden.

Um einen guten Wärmetransport zwischen Rohrrinnenwand und -außenwand zu erzielen und einen Einfluss durch die (temperaturabhängige) Wärmeleitfähigkeit λ_R innerhalb der Rohrwand zunächst zu minimieren, wird Kupfer aufgrund seiner sehr großen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_R = 305 \text{ W/(m K)}$ bei 20°C [68]) sowie seiner häufig anzutreffenden Verwendung in der Haustechnik betrachtet. Im Anwendungsgebiet der Haustechnik wird häufig Kupfer der Werkstoffnr. 2.0090 (Cu-DHP) eingesetzt, so dass auch dessen Stoffdaten (s. [68]) verwendet werden.

Zur Bestimmung des äußeren Wärmeübergangs sei freie Konvektion an der Rohraußenwand eines horizontal angeordneten Rohres angenommen. Weiterhin erfolgt keine Betrachtung des Emissionsgrades ε_{Ra} der Oberfläche der Rohraußenwand, da auf diesen in Kap. 2.2.4 näher eingegangen wird. Somit ergibt sich für den Wärmestromanteil \dot{Q}_S durch Wärmestrahlung mit $\varepsilon_{Ra} = 0$ entsprechend Gl. (2.24) ebenfalls ein Wert von Null.

Die Ermittlung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i kann dem Anhang A1.1 bzw. A1.2 sowie die des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_a dem Anhang A1.3 entnommen werden.

Wie aus Abb. 2.4 ersichtlich, zeigen die verschiedenen Medien in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit v_i und Mediumstemperatur T_M sehr unterschiedliche innere Wärmeübergangskoeffizienten α_i . Allgemein ist zu erkennen, dass mit zunehmender Mediumstemperatur T_M der Wärmeübergangskoeffizient α_i steigt, da es dann aufgrund des größeren Temperaturunterschiedes zur Umgebung zu einem größeren Wärmestrom \dot{Q} vom Medium durch die Rohrwand hin zur Umgebung kommt.

Silikonöl weist im Vergleich zu Wasser und Sattedampf einen deutlich niedrigen Wärmeübergangskoeffizient α_i auf (bei $T_M = 150^\circ\text{C}$: $112 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$ bei $0,1 \text{ m/s}$, $4.373 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$ bei 10 m/s). Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit v_i erhöht sich der Wärmeübergangskoeffizient α_i im Gegensatz zu Wasser deutlich geringer. Bei Wasser zeigt sich insbesondere im Bereich unterhalb von ca. $0,5 \text{ m/s}$ eine starke Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_i von der Strömungsgeschwindigkeit v_i . Sattedampf kann gemäß [53] im Strömungsbereich unterhalb von 10 m/s als ruhender Dampf angesehen werden, so dass sich seine Strömungsgeschwindigkeit v_i nicht signifikant auf den Wärmeübergangskoeffizienten α_i auswirkt. Mit über $50.000 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$ (bei $T_M = 150^\circ\text{C}$) weist Sattedampf einen Wärmeübergangskoeffizient α_i auf wie er nur bei Wasser mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten v_i erreicht werden kann.

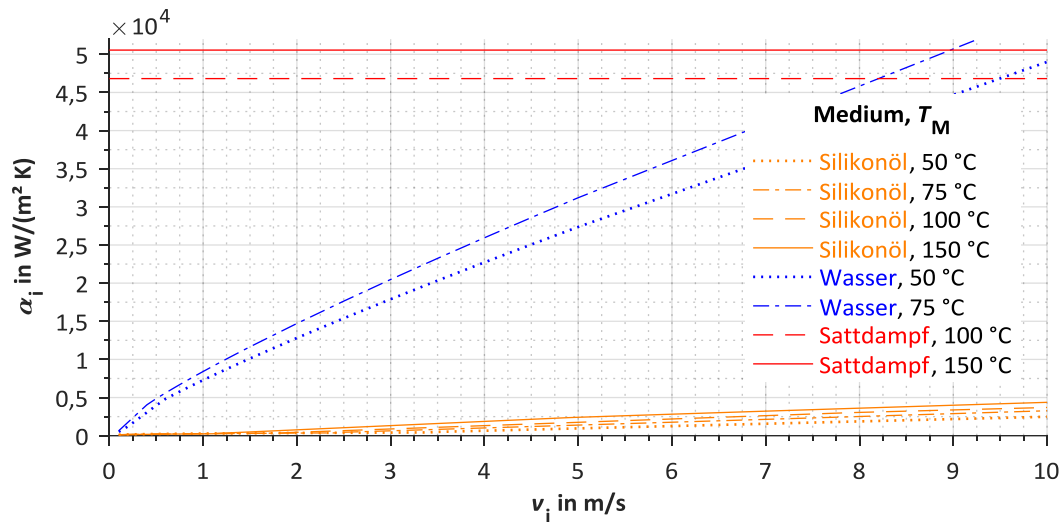


Abb. 2.4: Innerer Wärmeübergangskoeffizient α_i in Abhängigkeit von Medium, Mediumstemperatur T_M und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Die berechnete Abweichung ΔT_{Ra} der ungestörten Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} von der Mediumstemperatur T_M ($\Delta T_{Ra} = T_{Ra} - T_M$) kann der Abb. 2.5 entnommen werden.

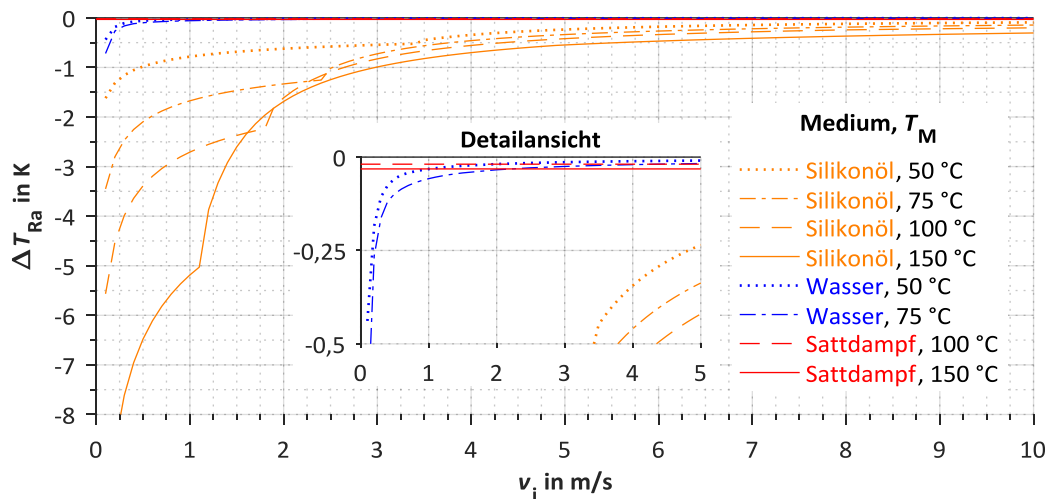


Abb. 2.5: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumstemperatur T_M in Abhängigkeit von Medium und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Deutlich sichtbar ist hierbei die vergleichsweise große Abhängigkeit der Mediumstemperatur T_M bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten v_i unterhalb von ca. 3 m/s bei Silikonöl. Durch Berechnung der Reynolds-Zahl kann eine Abschätzung der Strömungsausprägung erfolgen (s. Anhang A1.1), wodurch sich diese Abhängigkeit auf die Ausprägung einer laminaren Strömung bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten zurückführen lässt. Die laminare Strömung ist dabei verbunden mit einem deutlich größeren Temperaturgradienten zwischen Rohrachse und -innenwand. Mit Hilfe der ermittelten Reynolds-Zahl ist bspw. bei Silikonöl mit einer Mediumstemperatur T_M von 150 °C die Strömung bis 1,1 m/s als laminar und ab 5,0 m/s als turbulent anzusehen. Abweichungen vom Kennlinienverlauf im Bereich des Wechsels von laminarer Strömung auf den Übergangsbereich (1,2 m/s bis 4,9 m/s) sind auf Abweichungen durch die Modelle zurückzuführen.

Für Wasser zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit v_i unterhalb von ca. 1,5 m/s, welche zu deutlichen Abweichungen ΔT_{Ra} führen kann. So kann z. B. für Wasser bei 1,5 m/s eine geringe Abweichung ΔT_{Ra} von -0,022 K bei $T_M = 50\text{ °C}$ bzw. -0,040 K bei $T_M = 75\text{ °C}$ bestimmt werden.

Die geringste Abweichung ΔT_{Ra} folgt jedoch bei Satttdampf mit Werten von -0,016 K bei $T_M = 100\text{ °C}$ bzw. -0,026 K bei $T_M = 150\text{ °C}$, was auf den hohen Wärmeübergangskoeffizienten α_i zurückgeht.

Der Unterschied zwischen der berechneten Rohrrinnenwandtemperatur T_{Ri} und der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} ist mit Werten von unter 0,006 K für deren Betrag der Abweichung $|\Delta T_R|$ gering (s. Abb. 2.6). Die Abweichung $|\Delta T_R|$ ist weitgehend unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit v_i und beruht auf der hier betrachteten sehr gut wärmeleitenden Kupfer-Rohrwand geringer Dicke. Dies bestätigt, dass die Abweichung ΔT_{Ra} zwischen Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} und Mediumtemperatur T_M in diesem Fall zu großen Teilen auf dem Temperaturgradienten zwischen Rohrachse und -innenwand beruht.

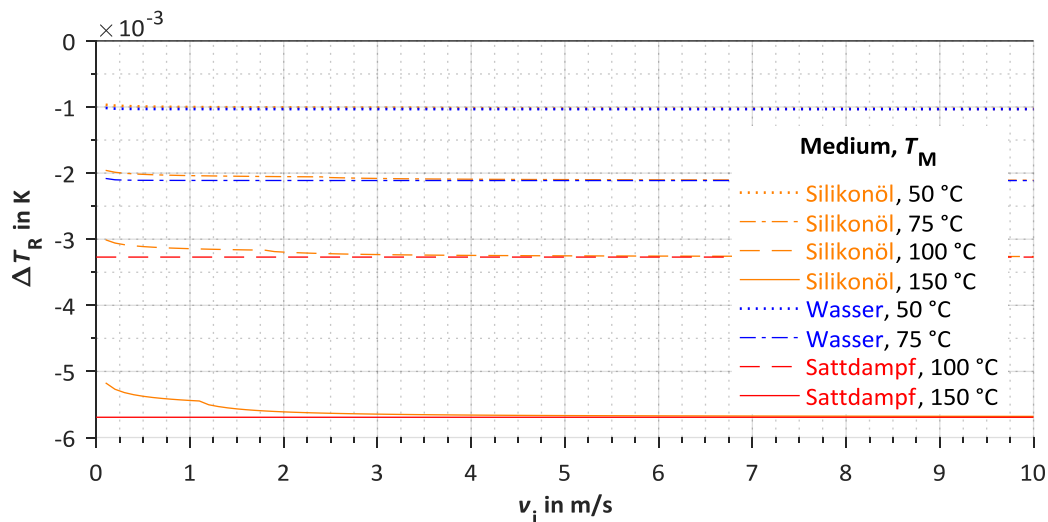


Abb. 2.6: Abweichung ΔT_R der Rohraußenwandtemperatur von der Rohrrinnenwandtemperatur in Abhängigkeit von Medium, Mediumtemperatur T_M und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$

In der zusammenfassenden Betrachtung zeigt sich, dass bei einer Messung mit Rohranlegethermometern sowohl das zu messende Medium als auch seine Strömungsgeschwindigkeit, insbesondere bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, beachtet werden muss. Dies ist, wie gezeigt wurde, selbst bei Rohren mit vergleichsweise kleinen Rohrdurchmessern u. U. zu berücksichtigen. Weiterhin sind bei größeren Rohrdurchmessern weitaus größere Beträge der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ der Rohraußenwand- von der Mediumtemperatur zu erwarten, da sich dann besonders der Temperaturgradient zwischen Rohrachse und Rohrrinnenwand weiter erhöhen kann.

2.2.3 Rohrdurchmesser und Rohrwanddicke

Um die Auswirkungen von Rohrdurchmesser und Rohrwanddicke auf die ungestörte Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} bzw. deren Abweichung ΔT_{Ra} von der Mediumstemperatur T_M zu ergründen, soll das im vorherigen Kapitel betrachtete Kupfer als Rohrmaterial mit Sattedampf als Medium betrachtet werden. Dadurch wird ein hoher Wärmeübergang sowohl zwischen Medium und Rohrrinnenwand als auch zwischen Rohrrinnenwand und Rohraußenwand hergestellt. Wie aus Abb. 2.7 hervorgeht, ist eine steigender Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ bei kleiner werdenden Rohrrinnendurchmesser d_i sowie zunehmender Rohrwanddicke d_R zu erwarten. Bei gleichbleibender Rohrwanddicke d_R folgt für kleinere Rohrrinnendurchmesser d_i ein nichtlineares Verhalten der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ abhängig vom Rohrrinnendurchmesser d_i . Hierbei ist eine größere Abhängigkeit zwischen Rohrrinnendurchmesser d_i und Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ besonders im kleineren zweistelligen mm-Bereich des Rohrrinnendurchmessers d_i zu erkennen. So ändert sich bspw. die Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ bei einer Rohrwanddicke d_R von 5 mm ab einem Rohrrinnendurchmesser d_i von ca. 65 mm nicht mehr wesentlich (< 1 mK). Bei konstantem Rohrrinnendurchmesser d_i ergibt sich jedoch eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ und Rohrwanddicke d_R .

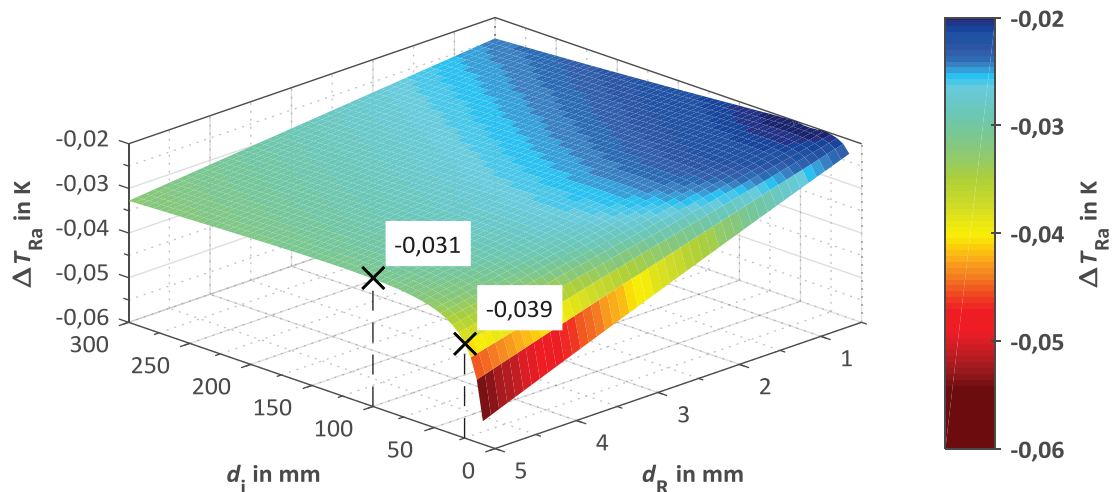


Abb. 2.7: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwand- von der Mediumstemperatur ($T_M = 150$ °C) in Abhängigkeit von Rohrrinnendurchmesser d_i und Rohrwanddicke d_R , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Aus der Betrachtung der Temperaturabweichung ΔT_R zwischen Rohrrinnenwand und Rohraußenwand folgt, dass diese mit Werten zwischen 6 % und 34 % in die jeweilige Abweichung ΔT_{Ra} ($\cong 100$ %) eingehen. Somit ist die sich ausprägende Abweichung ΔT_{Ra} zwischen Medium und Rohraußenwand vorrangig durch den inneren Wärmeübergang bzw. die Temperaturdifferenz ΔT_{Ri} bestimmt. Der geringe Einfluss der Abweichung ΔT_R zwischen Rohrrinnenwand und Rohraußenwand ist hierbei durch die hohe Wärmeleitfähigkeit λ_R des Kupfer-Rohrmaterials begründbar.

Wie aus Abb. 2.8 hervorgeht, ergibt sich bei Verwendung von Silikonöl (Strömungsgeschwindigkeit im Rohr $v_i = 10$ m/s) ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Abweichung ΔT_{Ra} und Rohrrinnendurchmesser d_i sowie Rohrwanddicke d_R .

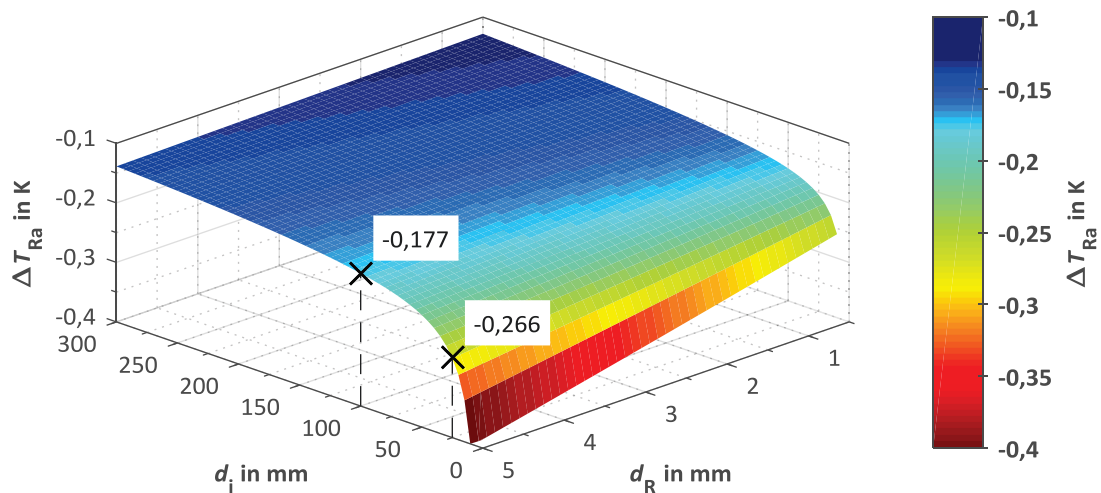


Abb. 2.8: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwand- von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von Rohrrinnendurchmesser d_i und Rohrwanddicke d_R , Medium: Silikonöl ($v_i = 10\text{ m/s}$), Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Bei allen Berechnungen ist zu beachten, dass auch die Länge des Rohres eine Rolle spielt. Während bei kleinen Rohrrinnendurchmessern und großen Rohrlängen der axiale Gradient der Mediumtemperatur am Rohreinlauf nur auf einen kleinen Teilbereich der Rohrlänge Auswirkungen hat, folgt für große Rohrrinnendurchmesser und kleine Rohrlängen ein axialer Gradient der Mediumtemperatur, welcher sich über einen weiten Bereich der Rohrlänge auswirken kann. Dadurch resultiert eine stärkere Abhängigkeit der betrachteten Rohraußenwandtemperatur von seiner axialen Rohrlage. Durch den hier betrachteten mittleren inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i ergibt sich somit eine über der Rohrlänge gemittelte Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} , welche jedoch für den Vergleich mit unterschiedlichen Rohrrinnendurchmessern d_i und Rohrwanddicken d_R als ausreichend angesehen werden kann.

2.2.4 Rohrmaterial sowie dessen Emissionsgrad

Im Nachfolgenden soll der Einfluss des Rohrmaterials sowie dessen Emissionsgrad ε_{Ra} (Oberflächenbeschaffenheit) näher ergründet werden. Neben dem bereits betrachteten Kupfer (2.0090) soll zum einen unlegierter Stahl der Werkstoffnr. 1.0345 (P235GH), welcher vorzugsweise in Dampferzeugern und -anlagen Verwendung findet [69], betrachtet werden. Zum anderen rostfreier Edelstahl (V2A) der Werkstoffnr. 1.4301, welcher am häufigsten angewandt wird [70] und bspw. in der Lebensmittel-, Chemie sowie Pharmazie eingesetzt wird. Weiterhin soll Polypropylen (PP) als Kunststoff betrachtet werden. Die thermophysikalischen Stoffdaten dieser 3 zusätzlich betrachteten Materialien können aus [50, D6.1. Tab. 3, D6.2. Tab. 3] entnommen werden.

Um bei den untersuchten Rohrmaterialien eine Beeinflussung durch den inneren Wärmeübergang zwischen Medium und Rohrrinnenwand zu minimieren, wird Sattedampf mit seinem hohem Wärmeübergangskoeffizienten α_i von über $50.000\text{ W/(m}^2\text{ K)}$ angesetzt.

Zum Vergleich des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit sollen, neben der nicht berücksichtigten Wärmestrahlung ($\varepsilon_{Ra} = 0$), verschiedene typische Oberflächenbeschaffenheiten Anwendung finden. Der Oberflächenbeschaffenheit entsprechender Emissionsgrad ε ($= \varepsilon_{Ra}$)

kann [50, 71-73] entnommen werden. Für den äußeren Wärmeübergang sei weiterhin freie Konvektion eines horizontal angeordneten DN ½"-Rohres angenommen.

Abb. 2.9 stellt die berechnete Abweichung ΔT_{Ra} der ungestörten Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} von der Mediumtemperatur T_M ($\Delta T_{Ra} = T_{Ra} - T_M$) dar.

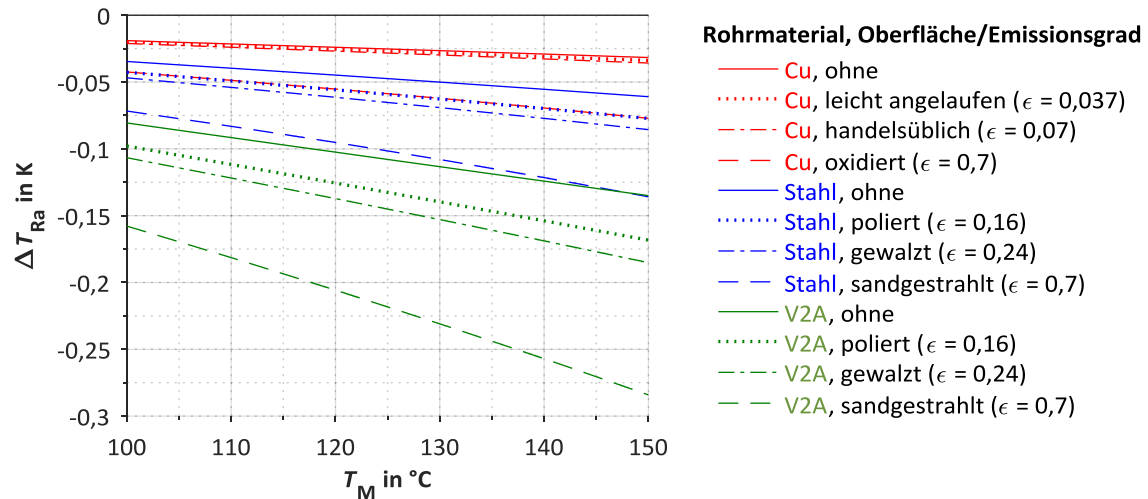


Abb. 2.9: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur T_M in Abhängigkeit von Rohrmaterial und Emissionsgrad ϵ (Rohroberflächenbeschaffenheit), Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion

Deutlich sichtbar ist, dass sich bei Kupfer als Rohrmaterial der geringste Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ ergibt. Zudem ist die Abhängigkeit der Abweichung ΔT_{Ra} von der Mediumtemperatur T_M klein ($\Delta(\Delta T_{Ra})/\Delta T_M < 0,3$ mK/K). Unter Betrachtung einer leicht angelaufenen oder handelsüblichen Oberfläche mit ihrem jeweiligen Emissionsgrad ϵ ergeben sich keine nennenswerten Änderungen der Abweichung ΔT_{Ra} . Bei oxidierten Oberflächen verdoppelt sich jedoch der Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$.

Für Stahl bzw. V2A folgt ohne Betrachtung des Emissionsgrades ϵ und im Vergleich zum Kupfer eine um den Faktor von ca. 2 bzw. 4 höherer Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$. Zudem zeigt sich eine größere Abhängigkeit der Abweichung ΔT_{Ra} von der Mediumtemperatur T_M .

Mit PP als Rohrmaterial kann, aufgrund dessen geringer Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_R = 0,22$ W/(m K) bei 20 °C [50, D6.2. Tab. 3]), eine dem Betrag nach hohe Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von 4,841 K (ohne Betrachtung des Emissionsgrades ϵ) bei seiner maximalen Einsatztemperatur von ca. 100 °C berechnet werden. Da andere typische Kunststoffe, wie bspw. Polyamid (PA), Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyurethan (PU) oder Polyvinylchlorid (PVC), eine ähnlich kleine Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_R = 0,17$ W/(m K), ... 0,25 W/(m K) [50, D6.2. Tab. 3]) aufweisen, kann allgemein geschlussfolgert werden, dass bei Verwendung von Kunststoffrohren große Abweichungen $|\Delta T_{Ra}|$ zur Bestimmung der Mediumtemperatur mittels Rohranlegethermometern folgen.

Wie gezeigt wurde, wirkt sich das Rohrmaterial selbst bei sehr dünnwandigen Rohren (hier: 1,65 mm Rohrwanddicke) deutlich auf die sich ausbildende Abweichung ΔT_{Ra} aus. Eine Kenntnis des verwendeten Rohrmaterials zur Messung mit Rohranlegethermometern ist damit unabdingbar. Weiterhin kann durch den Emissionsgrad ϵ typischer Oberflächenbeschaffenheiten eine deutlich größere Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ resultieren. Wird jedoch der Fühler eines Rohranlegethermometers direkt an die Rohraußenwand angekoppelt, so kann

der Einfluss des Wärmetransports durch Wärmestrahlung zwischen den Flächen des Fühlers und der Rohraußenwand infolge des geringen Temperaturunterschieds der beiden Flächen, selbst bei Ausprägung dazwischenliegender Luftspalte, i. A. weitgehend vernachlässigt werden.

2.2.5 Freie und erzwungene Konvektion sowie Rohrlage

In der Praxis treten bedingt durch die Rohrlage sowie eine freie bzw. erzwungene äußere Konvektion sehr unterschiedlich ausgeprägte Bedingungen auf, welche nähergehend ergründet werden sollen. Im Folgenden wird dazu zunächst für die beiden typischen Rohranordnungen lotrecht und horizontal der Fall einer freien Konvektion angenommen. Im realen Einsatzfall ist dies jedoch in den meisten Fällen nicht gegeben, da es durch angrenzende Anlagenteile sowie räumliche Anordnungen (z. B. Lüfter, Heizungen, weitere temperierte Rohre etc.) zu einer erzwungenen Konvektion kommen kann. Aus diesem Grund werden hierzu Berechnungen mit sowohl parallel entlang der Rohraußenwand als auch senkrecht zum Längsschnitt des Rohres führender äußerer Anströmungs- bzw. Konvektionsrichtung unter Variation der Strömungsgeschwindigkeit v_a im Bereich von 0,1 m/s bis 10 m/s vorgenommen. Weiterhin kann eine unter einem Winkel zur Rohrlängsachse gerichtete Strömung auftreten. Deren Einordnung kann hierbei zwischen den beiden Konvektionsrichtungen erfolgen und wird daher nicht separat betrachtet. Die zugrunde gelegte Herangehensweise zur Berechnung des äußeren Wärmeübergangs α_a für die erzwungene Konvektion ist dem Anhang A1.4 zu entnehmen.

Abb. 2.10 stellt die Abweichung ΔT_{Ra} in Abhängigkeit von der äußeren Strömungsgeschwindigkeit v_a und beiden Rohrlagen sowie Konvektionsrichtungen anschaulich dar. Wie in den bisherigen Kapiteln wird Sattedampf mit einer Mediumtemperatur T_M von 150 °C betrachtet. Weiterhin findet V2A als Rohrmaterial ohne Betrachtung von Wärmestrahlung Anwendung. Die Strömungsgeschwindigkeit $v_a = 0$ stellt den Fall einer ausschließlich freien Konvektion dar.

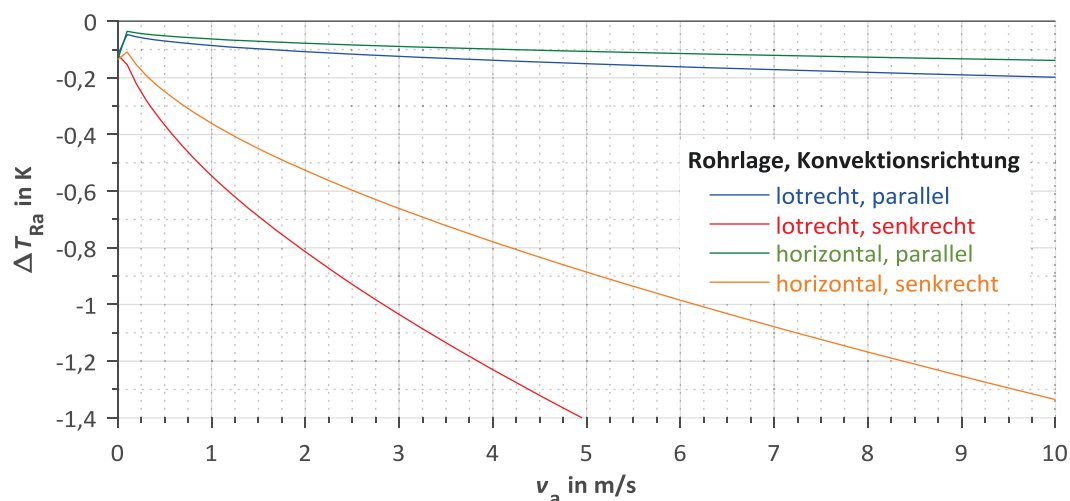


Abb. 2.10: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150$ °C) in Abhängigkeit von Rohrlage und Strömungsgeschwindigkeit v_a bei verschiedenen Rohranströmungen, Medium: Sattedampf, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Für freie Konvektion folgt je nach Rohrlage eine geringfügig unterschiedliche Abweichung ΔT_{Ra} von -0,119 K bei lotrechter bzw. -0,135 K bei horizontaler Rohrlage. Im Vergleich dazu

liegt die Abweichung ΔT_{Ra} bei Silikonöl (Strömungsgeschwindigkeit im Rohr $v_i = 10$ m/s, s. Abb. 2.11) bei -0,266 K in lotrechter bzw. bei -0,408 K in horizontaler Lage des Rohres. Die Temperaturunterschiede zwischen den beiden Rohrlagen sind dabei vorrangig auf den größeren Wärmeübergangskoeffizienten α_a von ca. 4,9 W/(m² K) bei lotrechter gegenüber von ca. 7,5 W/(m² K) bei horizontaler Rohrlage zurückzuführen.

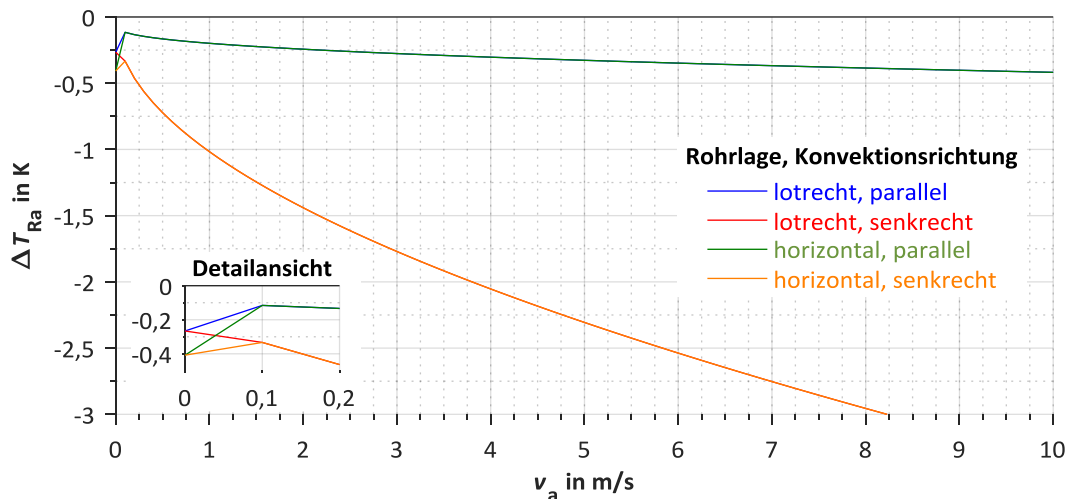


Abb. 2.11: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumstemperatur ($T_M = 150$ °C) in Abhängigkeit von Rohrlage, Strömungsgeschwindigkeit v_a und vers. Rohranströmungen, Medium: Silikonöl ($v_i = 10$ m/s), Rohrmaterial: V2A, $\epsilon_{Ra} = 0$

Bei Betrachtung einer erzwungenen Konvektion und Sattedampf als Medium ergibt sich mit zur Rohrachse parallel gerichteter Anströmung eine Unterscheidung zwischen lotrechter und horizontaler Rohrlage. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit v_a kommt es bei lotrechter Rohrlage zu einer stärker ausgeprägten Erhöhung des Betrages der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ als dies bei horizontaler Rohrlage der Fall ist. Dieses Verhalten kann durch verschiedene innere Wärmeübergangskoeffizienten α_i bei dem hier betrachteten Sattedampf begründet werden, da es bei lotrechter Anordnung zu einer Ausprägung eines Kondensatfilms an der Rohrrinnenwand kommt und sich dadurch der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i gegenüber der horizontalen Anordnung vermindert. Dieses Verhalten tritt bei Silikonöl sowie weiteren Liquiden nicht auf. Die in Abb. 2.11 zuerkennenden Maxima der Abweichung ΔT_{Ra} im Übergang zwischen freier und erzwungener Konvektion sind auf die, besonders bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten vorkommende, Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion (Mischkonvektion) zurückzuführen. Tendenziell ist der Einfluss bei paralleler Anströmung selbst bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten als eher gering zu bewerten.

Ein anderes Bild ergibt sich bei senkrecht zum Rohrlängsschnitt betrachteter Anströmung. Neben der bereits diskutierten Unterscheidung der lotrechten und horizontalen Rohrlage folgt für diese beide Varianten eine starke Abhängigkeit der Abweichung ΔT_{Ra} von der Strömungsgeschwindigkeit v_a , welche durch eine hohe Empfindlichkeit $\Delta T_{Ra}/v_a$ besonders bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten v_a gekennzeichnet ist. So kann mit Sattedampf im Bereich der Strömungsgeschwindigkeit $v_a = 0,5$ m/s eine Empfindlichkeit $\Delta T_{Ra}/v_a$ von ca. -0,414 K/(m/s) für die lotrechte Rohrlage bzw. -0,264 K/(m/s) für die horizontale Rohrlage ermittelt werden. Bei Silikonöl liegt die Empfindlichkeit $\Delta T_{Ra}/v_a$ mit -0,710 K/(m/s) unabhängig von der Rohrlage deutlich höher. Dies macht deutlich, dass selbst kleine äußere

Strömungsgeschwindigkeiten sowie deren Änderungen unmittelbare Auswirkungen auf die Abweichung ΔT_{Ra} haben können. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass Rohranlegethermometer bei ihrer praktischen Anwendung gegen diesen Einflussfaktor geschützt werden müssen, selbst wenn nur geringe äußere Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Eine Möglichkeit dafür stellt die Isolierung des Rohres dar, wie sie im folgenden Kapitel behandelt werden soll.

2.2.6 Rohrisolierung

Eine Möglichkeit, den Wärmetransport vom Medium an die Umgebung zu vermindern und somit eine geringere Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} von der Mediumtemperatur T_{M} zu erzielen, stellt die thermische Isolierung des Rohres dar. In der Praxis kommen hierbei bspw. geschäumte Polymere, wie z. B. Polyethylen (PE) bis ca. 100 °C, Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) bis 150 °C oder Mineralwolle bis ca. 650 °C zum Einsatz. Ihre Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ_{Iso} sind dabei mit ca. 0,040 W/(m K) bei 20 °C (vgl. [74-76]) sehr ähnlich zueinander.

Abb. 2.12 stellt zunächst die Abweichung ΔT_{Ra} in Abhängigkeit von einem Modell mit konzentrisch rohrumgebender EPDM-Isolierung des Rohres mit unterschiedlicher Isolierdicke d_{Iso} und verschiedenen Mediumstemperaturen T_{M} bei freier Konvektion sowie horizontaler Rohrlage dar. Der zugrundeliegende temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ_{Iso} des EPDM wurde [76] entnommen. Zur Berechnung sei auf [51, S. 29] verwiesen.

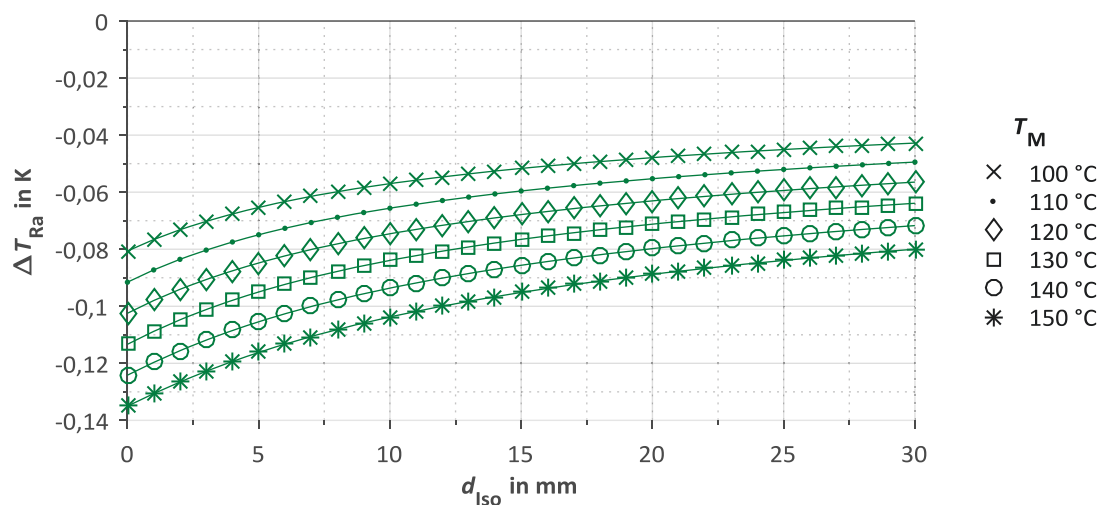


Abb. 2.12: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur in Abhängigkeit von der Mediumstemperatur T_{M} und umgebender EPDM-Isolierung unterschiedlicher Dicke d_{Iso} , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{\text{Ra}} = 0$

Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Mediumstemperatur T_{M} die Abweichung $|\Delta T_{\text{Ra}}(d_{\text{Iso}})|$ in Abhängigkeit von der Isolierdicke d_{Iso} dem Betrage nach steigt. Es ergeben sich dabei ähnliche Kurvenverläufe von $\Delta T_{\text{Ra}}(d_{\text{Iso}})$. Weiterhin folgt eine sukzessive Verringerung des Betrags der Abweichung $|\Delta T_{\text{Ra}}|$ mit zunehmender Isolierdicke d_{Iso} . Bei einer Mediumstemperatur T_{M} von 150 °C kann, ausgehend von einer Abweichung $\Delta T_{\text{Ra}} = -0,135$ K ($\triangleq 100\%$) ohne Isolierung, z. B. für eine Isolierdicke $d_{\text{Iso}} = 30$ mm eine Abweichung ΔT_{Ra} von -0,080 K berechnet werden. Dies entspricht einer prozentualen Verringerung von über 40 %. Der Verlauf von $\Delta T_{\text{Ra}}(d_{\text{Iso}})$ kann durch eine kubische Approximation angenähert

beschrieben werden. Aus der Gesamtbetrachtung folgt, dass bereits kleine Isolierdicken ($d_{\text{Iso}} < 5 \text{ mm}$) zu einer deutlichen Verringerung der Abweichung $|\Delta T_{\text{Ra}}|$ führen.

Um den Einfluss einer erzwungenen Konvektion im Umfeld des isolierten Rohres zu ergründen, stellt Abb. 2.13 die Abweichung ΔT_{Ra} in Abhängigkeit von einer EPDM-Isolierung des Rohres mit unterschiedlicher Isolierdicke d_{Iso} und einer freien ($v_a = 0 \text{ m/s}$) sowie erzwungenen Konvektion dar. Weiterhin werden verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten v_a mit senkrecht zum Rohrlängsschnitt gerichteter Anströmung bei einer Mediumtemperatur T_M von 150 °C betrachtet.

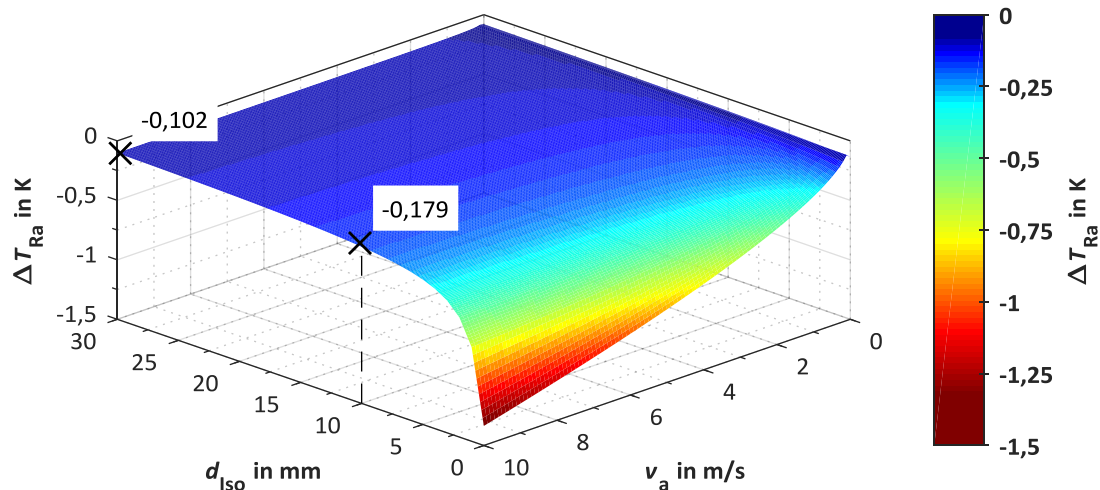


Abb. 2.13: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumstemperatur ($T_M = 150 \text{ °C}$) in Abhängigkeit von umgebender EPDM-Isolierung ($\lambda_{\text{Iso}} = 0,066 \text{ W/(m K)}$) unterschiedlicher Dicke d_{Iso} und Strömungsgeschwindigkeit v_a bei senkrechter Rohranströmung, Medium: Satttdampf, Rohrlage: horizontal, Rohrmaterial: V2A, $\epsilon_{\text{Ra}} = 0$

Ohne Isolierung ($d_{\text{Iso}} = 0$) folgt der bereits aus Abb. 2.10 bekannte Verlauf der Abweichung ΔT_{Ra} in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_a . Dabei ergibt sich bei einer Strömungsgeschwindigkeit v_a von 10 m/s bereits eine hohe Abweichung ΔT_{Ra} von $-1,340 \text{ K}$ ($\triangleq 100 \%$). Mit Hilfe einer Isolierdicke d_{Iso} von 10 mm kann die Abweichung ΔT_{Ra} auf $-0,179 \text{ K}$ reduziert werden, was einer prozentualen Verringerung um ca. 87% entspricht. Somit folgt, dass bereits kleine Isolierdicken ($d_{\text{Iso}} < 10 \text{ mm}$) zu einer signifikanten Verminderung des Einflusses einer erzwungenen Konvektion auf die Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} ermöglichen. Selbst bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten v_a erfolgt hierbei eine wirksame Reduzierung des Einflusses einer erzwungenen Konvektion auf die Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} .

Schlussfolgernd ist für die praktische Anwendung zur Messung mit Rohranlegethermometern festzustellen, dass bei zu erwartender erzwungener Konvektion im Umfeld des Rohres bzw. des angekoppelten Rohranlegethermometers eine thermische Isolierung zu empfehlen ist, um die sich ergebende Messabweichung ΔT_{Ra} des Rohranlegethermometers gering zu halten. Die Isolierung sollte dabei sowohl Rohr als auch Rohranlegethermometer möglichst vollständig umschließen, um Wärmebrücken sowie Wärmetransportvorgänge an den Bauteiloberflächen des Rohranlegethermometers zu vermindern.

2.2.7 Kontaktwiderstand

Bei der Ankoppelung eines Rohranlegethermometers an das Rohr wirkt sich u. a. ein zusätzlicher thermischer Kontaktwiderstand R_K zwischen Fühler und Rohraußenwand auf die Messung aus (vgl. Kap. 2.1.2). Dabei kann der Wärmetransport entsprechend [77] als Aufteilung in eine Wärmeleitung zwischen den gegenüberliegenden Festkörperberührungspunkten mit hoher Wärmeleitfähigkeit und in einen Wärmeübergang durch Lufteinschlüsse mit kleinem Wärmeübergangskoeffizienten unterschieden werden. Wird zusätzlich eine Wärmeleitpaste als Füllmaterial verwendet, kann dies an Stelle der Lufteinschlüsse ansatzweise betrachtet werden. Für den Fall von Lufteinflüssen sind aus [77, Tab. 2.1] Wärmeübergangskoeffizienten α_K des Kontaktwiderstands R_K für verschiedene Materialpaarungen und Anpressdrücke bei normaler Oberflächenbeschaffenheit bekannt. Deren angegebene Bandbreite ist jedoch vergleichsweise hoch, so wird bspw. für die Materialpaarung Kupfer/Kupfer ein Wärmeübergangskoeffizient α_K von 10.000 W/(m² K) bis 25.000 W/(m² K) im Druckbereich von ca. 1 bar bis 10 bar Anpressdruck angegeben. Unter der zusätzlich notwendigen Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren wie Oberflächenbeschaffenheit, Verschmutzungen etc. wird deutlich, dass eine theoretische Berechnung des Kontaktwiderstands nur einen ansatzweisen erfolgen kann und experimentelle Messungen zur genaueren Bestimmung nötig sind. Eine von der spezifischen Bauform eines Rohranlegethermometers losgelöste Betrachtung ist somit nur schwierig möglich.

Aufgrund unterschiedlichster Materialien von Rohr und Fühler des Rohranlegethermometers kann nicht für jede Materialpaarung ein äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient α_K in der Literatur gefunden werden. Weiterhin ist der Anpressdruck i. d. R. unbekannt, so dass im Folgenden zunächst der Kontaktwiderstand R_K als konzentrisch rohrumgebende dünne Luftschicht verschiedener Dicke d_{Luft} mit der äußeren Grenzschnitttemperatur T_K betrachtet werden soll. Letztgenannte stellt dann die theoretisch punktförmig vom Rohranlegethermometer gemessene Sensortemperatur dar.

In Abb. 2.14 ist die sich ergebende Abweichung ΔT_K der Grenzschnitttemperatur T_K von der Mediumtemperatur T_M ($\Delta T_K = T_K - T_M$) grafisch dargestellt.

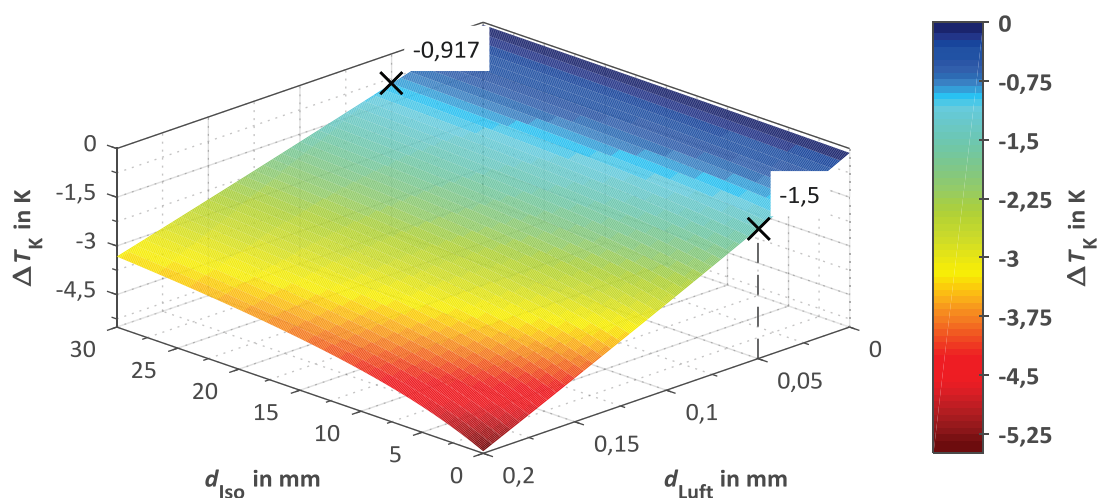


Abb. 2.14: Abweichung ΔT_K der Rohraußenwandtemperatur mit Luftschicht von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von umgebender EPDM-Isolierung unterschiedlicher Dicke d_{Iso} und verschiedenen Luftschichtdicken d_{Luft} , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{\text{Ra}} = 0$

Inwieweit sich eine zusätzliche thermische Isolierung auf eine Verringerung der Abweichung ΔT_K auswirkt, sei durch eine die Luftschicht umgebende konzentrische EPDM-Isolierung mit unterschiedlicher Dicke d_{iso} dargelegt.

Ohne Betrachtung der Isolierung ($d_{\text{iso}} = 0$) folgt ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Dicke d_{Luft} der Luftschicht und der Abweichung ΔT_K . Durch Approximation mittels linearer Regression kann hierbei eine Empfindlichkeit $\Delta T_K / \Delta d_{\text{Luft}}$ von $-24 \text{ mK}/\mu\text{m}$ bestimmt werden. Dies verdeutlicht, welchen Einfluss bereits kleine Luftschichten mit Dicken im ein- bzw. zweistelligen μm -Bereich auf die Abweichung ΔT_K nehmen können. Durch Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α_K der Luftschicht kann der Zusammenhang zu den aus [77, Tab. 2.1] bekannten Materialpaarungen hergestellt werden. Bspw. entspricht einer Luftschichtdicke d_{Luft} von $10 \mu\text{m}$ (mit $\alpha_K \approx 3.500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) der Materialpaarung zweier rostfreier Edelstahloberflächen ($\alpha_K = 2.000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \dots 3.700 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ [77, Tab. 2.1]). Dies entspricht bereits einer Verdopplung der Abweichung ΔT_K auf $-0,273 \text{ K}$ gegenüber der Berechnung ohne Luftschichtdicke ($-0,135 \text{ K}$).

Durch Verwendung einer thermischen Isolierung kann der Betrag der Abweichung $|\Delta T_K|$ zwar verringert werden, dennoch verbleibt eine im Vergleich zur Berechnung ohne Luftschicht signifikant höhere Abweichung $|\Delta T_K|$. So kann z. B. zwar bei einer Luftschichtdicke d_{Luft} von $0,05 \text{ mm}$ die Abweichung ΔT_K von $-1,5 \text{ K}$ ($\pm 100 \%$) mit Hilfe einer 30 mm dicken Isolierung um ca. 39% auf $-0,917 \text{ K}$ reduziert werden, jedoch steht diese einer deutlich geringeren Abweichung ΔT_K ($= \Delta T_{\text{Ra}}$) von $-0,135 \text{ K}$ ohne Isolierung und ohne Luftschicht gegenüber. Somit wird deutlich, dass sich zwar eine Isolierung bei häufig unvermeidbaren Luftspalten zwischen Fühler des Rohranlegethermometers und Rohraußenwand vorteilhaft auswirkt, eine signifikante Kompensation der Abweichung ΔT_K in ähnliche Größenordnungen wie ohne Betrachtung eines Luftspaltes (ΔT_{Ra}) findet allerdings nicht statt.

Abschließend ist bei Montage eines Rohranlegethermometers an die Rohraußenwand zu beachten, dass sich ausprägende Luftspalte möglichst vermieden werden sollten. Hierzu ist neben der konstruktiven Anpassung auf die Krümmung der Rohroberfläche, angepasster Oberflächenrauigkeiten, hoher Anpressdrücke, Auswahl von Materialpaarungen mit hohem Wärmeübergangskoeffizient etc. der Einsatz von gut wärmeleitenden thermischen Kontaktmaterial (z. B. Wärmeleitpaste) von Vorteil, um die resultierende Messabweichung von der Mediumtemperatur gering zu halten.

2.2.8 Umgebungstemperatur und Kopplungsfaktor

Die Umgebungstemperatur T_U beeinflusst das Potenzial des Wärmestroms \dot{Q} vom Medium hin zur Umgebung. Für die bisherigen Betrachtungen wurde eine konstante Umgebungstemperatur T_U von 20 °C angesetzt. Im praktischen Anwendungsfall sind jedoch durch äußere Bedingungen, wie z. B. Abwärme von Prozessen oder anderen Rohrleitungen, klimatische Bedingungen etc. sowohl höhere als auch niedrigere Umgebungstemperaturen T_U häufig anzutreffen. Im Folgenden soll der Einfluss der Umgebungstemperatur T_U näher erörtert werden.

Hierzu wird zunächst Silikonöl mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit v_i von 10 m/s als Medium betrachtet, da dieses im Gegensatz zum Sattedampf keine Abhängigkeit des inneren Wärmeübergangs α_i von der Rohrlage aufweist. In Abb. 2.15 ist bei einer konstant angenommenen Mediumtemperatur T_M von 150 °C die Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} von der Mediumtemperatur T_M in Abhängigkeit von der

Umgebungstemperatur T_U sowie der Rohrlage mit freier Konvektion dargestellt. Um weiterhin den Einfluss des Rohrmaterials zu ergründen, werden die in der Praxis häufig anzutreffenden Rohrmaterialien Kupfer als sehr gut wärmeleitendes ($\lambda_R = 326 \text{ W/(m K)}$) [68]) sowie V2A als weniger gut wärmeleitendes ($\lambda_R = 17 \text{ W/(m K)}$) [50 D6.2. Tab. 3]) Metall betrachtet.

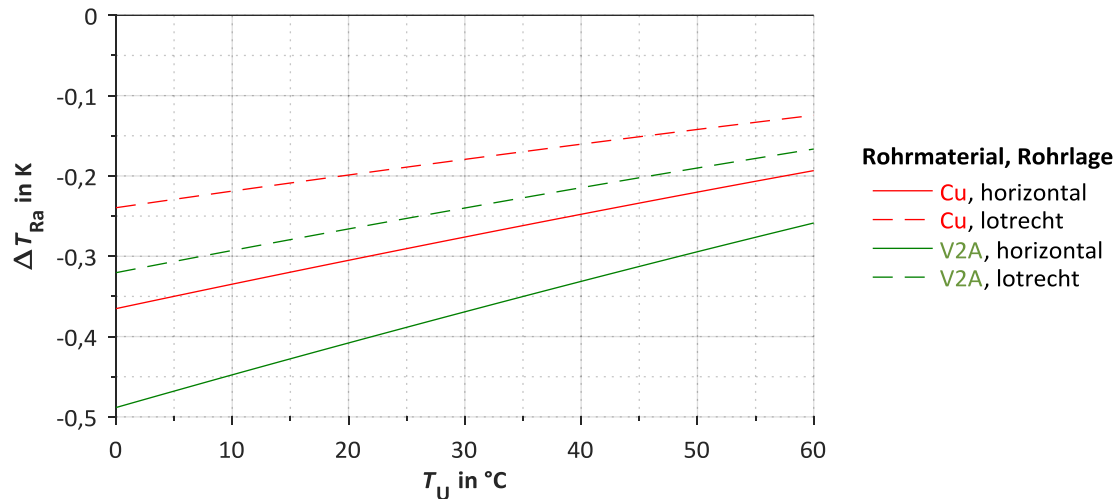


Abb. 2.15: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150 \text{ °C}$) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_U bei vers. Rohrlagen und Rohrmaterialien, Medium: Silikonöl ($v_i = 10 \text{ m/s}$), freie Konvektion, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Neben der, bereits aus Kap. 2.2.4 bekannten, größeren Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ bei V2A gegenüber Kupfer zeigt sich für beide Rohrmaterialien ein nahezu lineares Verhalten über den betrachteten Umgebungstemperaturbereich T_U von 0 °C bis 60 °C . Durch Approximation mittels linearer Regression kann somit bei Kupfer eine Empfindlichkeit $\Delta T_{Ra}/\Delta T_U$ der Abweichung ΔT_{Ra} von einer Änderung der Umgebungstemperatur ΔT_U von $2,9 \text{ mK/K}$ bei horizontaler bzw. $1,9 \text{ mK/K}$ bei lotrechter Rohrlage ermittelt werden. Für V2A folgt ein Wert von $3,8 \text{ mK/K}$ für die horizontale bzw. $2,6 \text{ mK/K}$ für die lotrechter Rohrlage. Es zeigt sich damit, dass der Einfluss von einer Änderung der Umgebungstemperatur ΔT_U einerseits von Rohrmaterial und -lage (freier Konvektion) abhängig ist. Andererseits bewirken selbst größere Umgebungstemperaturänderungen ΔT_U nur eine geringe Änderung der Abweichung ΔT_{Ra} . So folgt z. B. auf eine Umgebungstemperaturänderung ΔT_U um 20 K eine Änderung der Abweichung ΔT_{Ra} von ca. 76 mK bei V2A als Rohrmaterial in horizontaler Rohrlage. Verglichen mit dem Einfluss auf die berechnete Abweichung ΔT_{Ra} durch erzwungene Konvektion im Umfeld des Rohres (vgl. Kap. 2.2.5) und dem thermischen Kontaktwiderstand (vgl. Kap. 2.2.7) können diese beiden Einflussgrößen somit eine bedeutendere Rolle als die Umgebungstemperatur spielen.

In Analogie zum Kopplungsfaktor B (s. Gl. (2.18)) kann hier der Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ zur Betragsdifferenz $|\Delta T_{U,M}|$ zwischen Umgebungstemperatur T_U und Mediumtemperatur T_M berechnet werden. Die Verwendung des Kopplungsfaktors B stellt eine allgemein in der Literatur (z. B. [48, 78]) übliche Charakterisierungsmöglichkeit von Oberflächen-Temperaturfühlern dar. Des Weiteren nutzen einige Hersteller ihn zur Angabe der erzielbaren Messabweichung des Rohranlegethermometers in Abhängigkeit von einer Temperaturdifferenz $\Delta T_{U,M}$ zwischen Medium und Umgebung (vgl. [79, 80]). Hierbei ist zu beachten, dass durch Verwendung des Betrags der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{U,M}|$ keine Rückschlüsse

auf die sich ändernde Größe, d. h. Umgebungstemperatur T_U und/oder Mediumstemperatur T_M , möglich sind. So lässt sich bspw. eine Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ von 10 K bei einer Mediumstemperatur T_M von 20 °C und einer Umgebungstemperatur T_U von 10 °C ebenso wie bei einer Mediumstemperatur T_M von 60 °C und einer Umgebungstemperatur T_U von 50 °C finden. Beide Fälle können jedoch eine unterschiedliche Abweichung ΔT_{Ra} aufweisen, welche durch unterschiedliche Wärmeübergangsbedingungen zwischen Medium und Umgebung bedingt sein können. Abb. 2.16 stellt diesen Sachverhalt anschaulich anhand der Abhängigkeit der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ dar. Hierbei wird sowohl die Umgebungstemperatur T_U im praktisch relevanten Einsatzbereich von 0 °C bis 60 °C als auch die Mediumstemperatur T_M (Silikonöl: 30 °C ... 150 °C, Wasser: 30 °C ... 95 °C, Sattdampf: 100 °C ... 150 °C) variiert. Für eine Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ ergeben sich somit mehrere mögliche Abweichungen $|\Delta T_{Ra}|$. Die in Abb. 2.16 dargelegten Bereiche der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ folgen dabei aus dem Minimum und Maximum der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ bei einer Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$. Weiterhin wurde sowohl die horizontale als auch lotrechte Rohrlage mit freier Konvektion betrachtet.

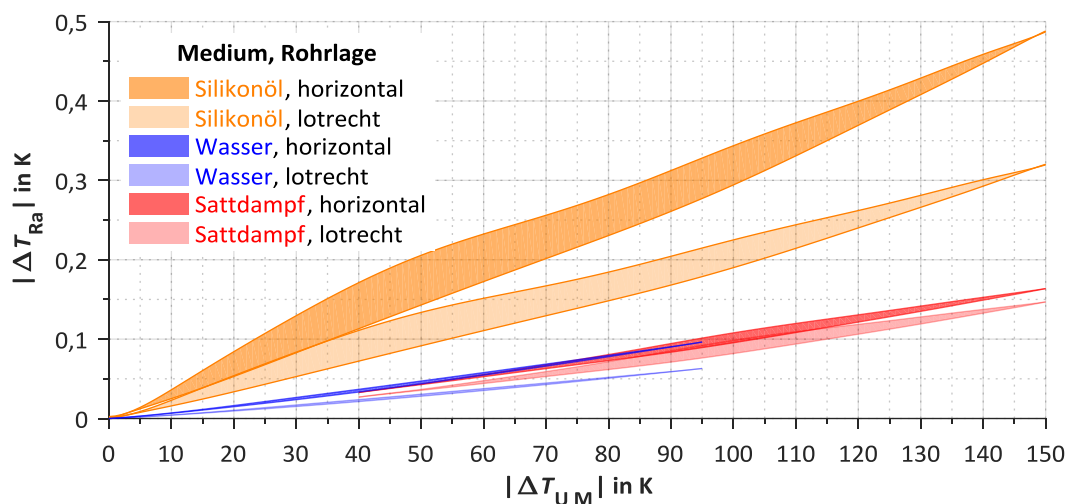


Abb. 2.16: Bereiche der Kopplung der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ zwischen Umgebung und Medium mit verschiedenen Medien (Liquide: $v_i = 10$ m/s) und Rohrlagen sowie bei Variation der Umgebungstemperatur $T_U = 0$ °C ... 60 °C und der Mediumstemperatur T_M (Silikonöl: 30 °C ... 150 °C, Wasser: 30 °C ... 95 °C, Sattdampf: 100 °C ... 150 °C), freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Bei Betrachtung von Silikonöl ergibt sich hierbei bereits bei einer kleinen Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ zwischen Umgebung und Medium eine große Bandbreite der möglichen Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$. So folgt bspw., in Abhängigkeit einer Änderung der Umgebungstemperatur T_U und/oder Mediumstemperatur T_M , bereits bei einer Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ von 30 K eine Änderung der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ im Bereich von ca. ± 23 % (bezogen auf den Mittelwert von $|\Delta T_{Ra}|(|\Delta T_{UM}| = 30 \text{ K}) \triangleq 100$ %) für die horizontale als auch lotrechte Rohrlage. In Analogie dazu kann bei gleicher Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}| = 30$ K bei Wasser als Medium nur eine Änderung der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von ca. ± 6 % bestimmt werden. Für Sattdampf kann die größte Änderung der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ bei einer Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ von 100 °C ermittelt werden. Sie beträgt ca. ± 6 % bei horizontaler und ca. ± 10 % bei lotrechter Rohrlage. Sowohl Wasser als auch Sattdampf zeigen somit eine deutlich geringere Abhängigkeit der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ auf eine Änderung der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ bei Variation von Umgebungstemperatur T_U und Mediumstemperatur T_M .

Dadurch wird deutlich, dass Angaben zu erzielbaren Messabweichungen, welche lediglich auf der Temperaturdifferenz ΔT_{UM} zwischen Umgebung und Medium beruhen, je nach Art des Mediums sowie des Umgebungs- bzw. Mediumstemperaturbereichs i. d. R. nicht geeignet erscheinen.

Das Verhalten der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ kann je nach Parameteränderung von Umgebungstemperatur T_U und Mediumstemperatur T_M als progressiver, degressiver oder annähernd linearer Verlauf beschrieben werden. Bei konstant betrachteter Umgebungstemperatur T_U von 20 °C und gleicher Variation der Mediumstemperatur T_M kann, wie aus Abb. 2.17 hervorgeht, ein weitgehend linearer Verlauf für die verschiedenen Medien erreicht werden.

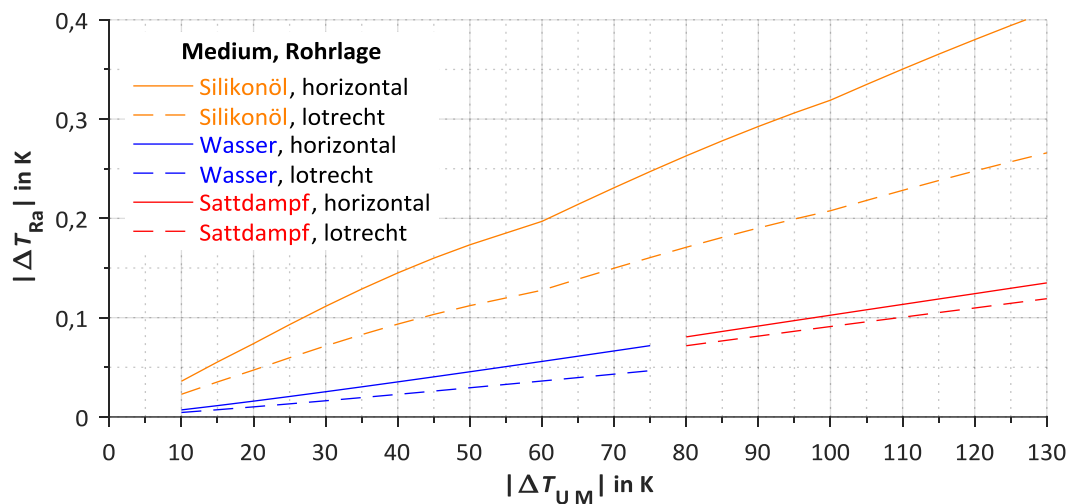


Abb. 2.17: Kopplung der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ zwischen Umgebung und Medium mit verschiedenen Medien (Liquide: $v_i = 10$ m/s) und Rohrlagen sowie bei Variation der Mediumstemperatur T_M , Umgebungstemperatur $T_U = 20$ °C, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$

Durch Approximation mittels linearer Regression kann die Empfindlichkeit $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$ (bei $T_U = 20$ °C) ermittelt werden. Hierbei zeigt sich, dass bei Wasser (mit $v_i = 10$ m/s) die geringsten Empfindlichkeiten $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$ mit 1,0 mK/K bei horizontaler bzw. 0,7 mK/K bei lotrechter Rohrlage erreicht werden können. Ähnliche Ergebnisse liefert Sattedampf als Medium (Empfindlichkeit $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$: 1,1 mK/K bei horizontaler, 1,0 mK/K bei lotrechter Rohrlage). Im Gegensatz dazu können bei Silikonöl (mit $v_i = 10$ m/s) vergleichsweise hohe Empfindlichkeiten $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$ mit ca. 3 mK/K bei horizontaler und ca. 2 mK/K bei lotrechter Rohrlage berechnet werden.

Schlussfolgernd sind für den praktischen Einsatz eines Rohranlegethermometers bei einer Änderung der Temperaturdifferenz $|\Delta T_{UM}|$ eine Vielzahl von Einflussgrößen zu berücksichtigen. Wie gezeigt wurde, reicht es i. d. R. nicht aus sich ausschließlich auf äußere Einflussgrößen, wie Rohrmaterial, Rohrlage sowie Rohrgeometrie zu beschränken, da bspw. das verwendete Medium einen deutlichen Einfluss auf die Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ und die Empfindlichkeit $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$ nehmen kann. Allgemein ist jedoch bei lotrechter Rohrlage sowohl mit einem geringeren Betrag der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ als auch kleineren Empfindlichkeit $|\Delta T_{Ra}|/|\Delta T_{UM}|$ zu rechnen. In der Praxis ist die Umgebungstemperatur T_U häufig nicht bekannt und veränderlich, so dass u. U. mit einer deutlichen Abhängigkeit der Abweichung $|\Delta T_{Ra}|$ von der Umgebungstemperatur T_U zu rechnen ist, insbesondere bei Medien mit

kleinem inneren Wärmeübergangskoeffizient zwischen Medium und Rohrrinnenwand (vgl. Silikonöl in Abb. 2.16). Durch thermische Isolierung kann der Einfluss von der Umgebungstemperatur T_U jedoch vermindert werden (s. Kap. 2.2.6).

2.2.9 Zusammenfassung

In der zusammenfassenden Darstellung der rechnerisch ermittelten Größen wird deutlich, dass selbst für den vereinfachten Fall einer vom Rohranlegethermometer thermisch rückwirkungsfrei betrachteten Temperaturmessung an der Rohraußenwand bereits eine Vielzahl von Einflussgrößen die erzielbare Abweichung zwischen Rohraußenwand- und Mediumstemperatur beeinflussen. Da die Einflussgrößen untereinander in Wechselwirkung treten können, kann jedoch i. A. keine grundsätzliche Aussage über die Beeinflussung einer Einflussgröße auf die zu erwartende Abweichung getroffen werden. Somit können einzelne Einflussgrößen nicht losgelöst von anderen betrachtet werden. Tendenziell zeigt sich dennoch, dass insbesondere der thermische Kontaktwiderstand zu einer deutlichen Abweichung führen kann. Hingegen kann mit Hilfe einer thermischen Isolierung die Abweichung vermindert werden.

Für weitergehende Berechnungen unter Berücksichtigung der Rückwirkung des angekoppelten Rohranlegethermometers ist stets die genaue konstruktive Kenntnis des verwendeten Rohranlegethermometers nötig. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Bauformen und der Komplexität der Berechnungen bieten sich hierbei experimentelle Messungen unter praxisnahen Bedingungen an. Im folgenden Verlauf der Arbeit wird daher der Fokus auf praktische Messungen und deren Vergleich mit den hier dargestellten berechneten Einflussgrößen gelegt.

2.3 Eignung von Prüfverfahren sowie -einrichtungen

Basierend auf den vorhergehenden Kapiteln dieser Arbeit wird deutlich, dass zur messtechnischen Charakterisierung und Vergleich von Rohranlegethermometern unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen praktische Prüfeinrichtungen nötig sind.

Aus der Literatur sind hierzu nur wenige Veröffentlichungen bekannt, welche Prüfeinrichtungen speziell für Rohranlegethermometer sowie praktische Messergebnisse beinhalten. Im Nachfolgenden sollen daher bisherig angewandte Herangehensweisen zur Messung analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für vergleichende Messungen von Rohranlegethermometern bewertet werden. In diesem Zusammenhang sind auch typisch angewandte Kalibriermethoden von Thermometern (vgl. [81, 82]) von Interesse.

2.3.1 Eintauchende Messungen im Thermostat

Neben der Kalibrierung von Thermometern an Fixpunkten kommen üblicherweise Vergleichsverfahren zum Einsatz.

Eine allgemein bekannte Möglichkeit hierfür stellt der Einsatz eines Blockthermostaten dar, in welchem sich ein möglichst homogener temperierter Festkörper mit Bohrungen zur Aufnahme des zu untersuchenden Thermometers sowie eines Kalibriernormals befinden. Typischerweise können somit nur Kalibrierungen von Thermometern mit zylindrischem Einbau- bzw. Schutzrohren vorgenommen werden. Durch die sich davon stark unterscheidenden Geometrien von Rohranlegethermometern scheidet eine Verwendung von Blockthermostaten zur Messung von Rohranlegethermometern damit jedoch aus.

Mittels eines Badthermostaten mit einem homogen temperierten Medium und einem Kalibriernormal kann dieser Umstand vermieden werden und prinzipiell verschiedene Bauformen von Rohranlegethermometern ohne Anpassungen eingebracht werden. Durch das sich dann ergebende vergleichsweise stabile Temperaturfeld (s. [83]) um das Rohranlegethermometer ergibt sich jedoch für das Rohranlegethermometer eine nahezu gleiche Sensor- als auch Umgebungstemperatur. Dieser Umstand entspricht jedoch nicht dem praktischen Anwendungsfall an einem Rohr, da die dabei auftretenden Wärmetransportvorgänge durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung zwischen Sensorelement und Umgebung im Badthermostat nicht auftreten bzw. zu vernachlässigen sind. So findet bspw. eine Wärmeableitung an die Umgebung des Badthermostaten nur über die Anschlussleitung des Rohranlegethermometers statt und kann bei entsprechender Eintauchtiefe i. d. R. vernachlässigt werden. Weiterhin sind eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Rohranlegethermometern aufgrund ihres konstruktiven Aufbaus sowie ihrer verwendeten Materialien nicht für eintauchende Messungen geeignet. Bei entsprechender Eignung ist die eintauchende Messung in einem Badthermostat an mehreren Temperaturpunkten jedoch zur Bestimmung der Sensorkennlinie des Rohranlegethermometers geeignet und empfehlenswert. Dadurch kann der Kennlinienfehler eines Rohranlegethermometers im Vorfeld seines Einsatzes bestimmt und ggf. korrigiert werden (s. a. [84]).

2.3.2 Prüfeinrichtung für Oberflächen-Tasttemperaturfühler

Zur Messung von Oberflächen-Tasttemperaturfühlern sind diverse Arbeiten (u. a. [78, 85-89]) bekannt, dabei kommen vorzugsweise ebene Prüfkörper aus gut wärmeleitenden Materialien zum Einsatz. Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik existiert hierzu bspw. eine Prüfeinrichtung [78], bei welcher ein austauschbarer Prüfkörper (\varnothing : ca. 75 mm, Höhe: 25 mm) durch eine darunterliegende elektrische Heizung im Bereich von 50 °C bis 500 °C geregelt temperiert werden kann. Die Prüfkörper bestehen aus Aluminium, Stahl oder Kupfer mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten. Im Prüfkörper selbst sind 3 fluchtend in axialer Richtung des Prüfkörpers liegende, kalibrierte Thermolemente mit unterschiedlichen Abständen zur Oberfläche so eingebracht, dass auf die Oberflächentemperatur extrapoliert werden kann. Mit Hilfe einer Aufsetzvorrichtung können die Tasttemperaturfühler senkrecht auf die Oberfläche des Prüfkörpers aufgesetzt werden. Weithin besteht die Möglichkeit zusätzliche Anpresskräfte sowie Winkelabweichungen beim Aufsetzen nachzubilden. Somit können sowohl statische als auch dynamische Messabweichungen der Tastfühler reproduzierbar gemessen werden. Neben der Anwendung dieser Prüfeinrichtung in der VDI/VDE 3522-2 [61] gibt es bereits Ringvergleiche mit unterschiedlichen Prüfeinrichtungen von 11 metrologischen Staatsinstituten, siehe [89]. Der Vergleich weist die Problematik auf, dass selbst bei gleichem Oberflächen-Tasttemperaturfühler die erzielbaren Messabweichungen zwischen dem Anzeigewert des Fühlers und der (extrapolierten) Oberflächentemperatur stark von den jeweilig verwendeten Prüfeinrichtungen abhängig sind. Ebenso werden die Messunsicherheiten sehr unterschiedlich bewertet.

Prinzipiell wäre auch eine Abänderung des ebenen Prüfkörpers in eine konvex geformte Oberfläche oder in einen Stab kreisrunden Querschnitts möglich, um an einer ähnlichen gestalteten Prüfeinrichtung Rohranlegethermometer zu untersuchen. Eine konvexe Oberfläche bildet jedoch ein Rohr nur unzureichend nach, da diese Anordnung zu einer deutlichen Veränderung der Umgebungsbedingungen, wie bspw. der Ausprägung der freien

Konvektion in der Umgebung, führt. Weiterhin kann hierbei die bei Rohranlegethermometern häufig anzutreffende thermometerspezifische Rohrbefestigung nicht verwendet werden. Somit scheidet diese Variante aus. Bei Verwendung eines Stabes als Prüfkörper zeichnen sich ebenso Probleme ab. Zum einen müsste der Wärmeeintrag durch eine Heizung im Inneren des Stabes, nahe seiner Längsachse und mit entsprechend zur Staboberfläche homogenen radialen Wärmestrom erfolgen. Zum anderen gestaltet sich die Extrapolation auf die Oberflächentemperatur mittels mehrerer Thermoelemente bei kleinen Rohrdurchmessern als schwierig, da dafür zu wenig Bauraum im Prüfkörper vorhanden ist.

2.3.3 Messungen am Wasser-Strömungskanal

Eine einfache Möglichkeit einen geeigneten Prüfaufbau zu konstruieren stellt die Verwendung einer durchströmten Rohrleitung mit befestigten Rohranlegethermometer als integraler Bestandteil eines temperierten Kreislaufes dar. Aus den theoretischen Betrachtungen des Kap. 2.2 wird deutlich, dass hierzu Medien mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit sowie gutem Wärmeübergangsverhalten zwischen Medium und Rohrrinnenwand geeignet sind. Aufgrund des hohen inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i im 5-stelligen $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ -Bereich bietet sich hierzu besonders Wasser als Medium an (vgl. Kap. 2.2.2).

Eine entsprechende Anwendung stellen die aus [90, 91] bekannten Messungen mit einem Wasser-Strömungskanal und verschiedenen Rohranlegethermometern dar. Eine nähergehende Beschreibung des verwendeten Aufbaus findet sich in Kap. 6.8.1 wieder. Die Ergebnisse anhand von 4 verschiedenen, kommerziell erhältlichen, Rohranlegethermometern zeigen dabei deutliche Unterschiede in ihren Messabweichungen von der Mediumstemperatur. Des Weiteren wird die Abhängigkeit der Messabweichung von der Durchflussmenge bzw. Strömungsgeschwindigkeit deutlich, wobei ein vergleichbares Verhalten wie in Abb. 2.5 (Wasser, 75 °C) erkennbar ist. Zudem werden verschiedene thermische Kontaktierungen ohne und mit Verwendung von Wärmeleitpaste bzw. -folie zwischen einem Rohranlegethermometer und dem verwendeten DN ½"-Rohr untersucht. Hierbei zeigt sich, dass die Messabweichungen bei Anwendung von Wärmeleitpasten mehr als halbiert werden können. Weitergehende Betrachtungen zur Bestimmung von Einflussgrößen wie bspw. erzwungener Konvektion oder thermischer Isolierung erfolgten jedoch nicht. Neben der Beeinflussung durch die Strömungsgeschwindigkeit kann der verwendete Mediumstemperaturbereich von 25 °C bis 90 °C [91] als zu eingeschränkt angesehen werden. Messungen im oberen Bereich der typischen Einsatztemperatur von Rohranlegethermometern sind somit nicht möglich. Der Wasser-Strömungskanal stellt jedoch eine gute Vergleichsmöglichkeit dar und wird auch in dieser Arbeit für vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Messeinrichtungen (s. Kap. 6.8) verwendet.

2.3.4 Messungen mit Sattedampf als Medium

Die theoretischen Betrachtungen aus Kap. 2.2 zeigen, dass mit Sattedampf als Medium ein sehr hoher innerer Wärmeübergangskoeffizient α_i mit über 45.000 $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ erzielt werden kann. Zudem ergibt sich keine Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit.

In der unveröffentlichten Literatur [92-94] sind der Aufbau eines Prüfstandes mit Sattedampf als Medium und erste Messungen von Rohranlegethermometern beschrieben. Der Prüfstand besteht dabei im Wesentlichen aus einem Dampferzeuger, einem mechanischen Druckminderer, Kondensatabscheidern und mehreren Prüfstreckenabgängen. An jedem

Abgang befindet sich ein Widerstandsthermometer, welches als Referenz zur Bestimmung der Mediumtemperatur dient. Es existieren zudem verschiedene Prüfstreckenrohre, deren Rohraußendurchmesser von DN $\frac{3}{8}$ " (9,53 mm) bis DN $\frac{1}{4}$ " (19,05 mm) reichen. Eine Änderung der Mediumtemperatur erfolgt nur indirekt mittels Manometer und manuellen Einstellen des Sattedampf-Überdruckes, womit keine automatisierbaren Messungen möglich sind. Daraus ergibt sich eine geringe Stabilität der Sattedampftemperatur (Standardabweichung: 0,120 K bei 120 °C [92]). Die Mediumtemperatur kann nur in einem sehr eingeschränkten Einsatztemperaturbereich von 110 °C bis 130 °C [92] eingestellt werden.

Anhand von 4 unterschiedlichen, kommerziell erhältlichen, Rohranlegethermometern werden an dem Prüfstand zunächst Messungen mit einem Rohranlegethermometer sowie verschiedenen thermischen Kontaktierungen durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen, dass die Messabweichung des Sensors von der Mediumtemperatur ohne Verwendung von Wärmeleitpaste im Vergleich zur Messung mit Wärmeleitpaste halbiert und mit zusätzlicher thermischer Isolierung weiter geringfügig gesenkt werden kann. Hierbei zeigen sich somit ähnliche Tendenzen wie bei den in Kap. 2.2 dargelegten Einflussgrößen.

Die Arbeiten lassen jedoch einige Fragestellungen offen, z. B. zur Reproduzierbarkeit durch die Montage und Demontage der Rohranlegethermometer bei konstanter Mediumtemperatur, den Einfluss der Umgebungstemperatur oder der Beeinflussung durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten bei einer erzwungenen Konvektion. Zudem ist auch die Oberflächenbeschaffenheit der verwendeten Prüfstreckenrohre unklar.

2.4 Variantenvergleich und Auswahl eines geeigneten Prüfstandes

Aus den vorhergehenden Betrachtungen des Kap. 2.3 wird deutlich, dass bereits in geringem Umfang praktische Messungen mit Rohranlegethermometern erfolgt sind. Dabei wurden vorzugsweise Prüfeinrichtungen mit Medien verwendet, welche einen guten Wärmeübergang zwischen Medium und Rohrrinnenwand der eingesetzten Rohrleitungen ermöglichen. Hierfür bieten sich sowohl aus theoretischer als auch praktischer Sicht insbesondere Wasser und Sattedampf an.

Prüfstände auf Basis von Wasser haben jedoch den Nachteil, dass ihr Einsatztemperaturbereich durch den Siedepunkt von 99,974°C (unter Normbedingungen) begrenzt ist. Ein weiteres Problem stellt die deutliche Abhängigkeit des Temperaturgradienten zwischen Rohrachse und Rohrrinnenwand von der Strömungsgeschwindigkeit dar. Zudem kann i. d. R. keine genaue Aussage über das Strömungsprofil und damit einhergehend über den Temperaturgradienten zwischen Rohrachse und Rohrrinnenwand getroffen werden. Bspw. kann ein asymmetrisch zum Rohrmittelpunkt (des Rohrquerschnitts) ausgerichtetes Strömungsprofil zu unterschiedlichen Temperaturen an der Rohrrinnenwand führen, wodurch wiederum eine unterschiedliche Temperaturverteilung über der Rohraußenwand entstehen kann. Eine reproduzierbare Messung ist somit möglicherweise nicht gewährleistet.

Eine von Strömungsgeschwindigkeit und -profil weitgehend unabhängige Lösung stellt die Verwendung von ruhendem Sattedampf als Medium dar. Durch den sich ausprägenden geringen Temperaturgradienten im Inneren des Rohres wird die Messabweichung zwischen Mediums- und Rohrrinnenwand- bzw. Rohraußenwandtemperatur auf ein Minimum reduziert und so die Möglichkeit einer durch das Medium gering beeinflussten Messung der

Mediumstemperatur mittels eines Rohranlegethermometers ermöglicht. Ein weiterer Vorteil ist es, dass unterschiedliche Rohrdurchmesser ohne größere Anpassungen in einem Prüfstand betrieben werden können, da i. d. R. keine von der Rohrgeometrie abhängige unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit bzw. -profil betrachtet werden muss. Weiterhin kann von einer reproduzierbareren Messung als bei Prüfständen mit Wasser ausgegangen werden, da Schwankungen durch die Regelung auf eine Strömungsgeschwindigkeit durch z. B. eine Pumpe entfallen.

Schlussfolgernd erscheint ruhender Sattedampf am ehesten geeignet, um die Messabweichungen der Rohranlegethermometer unter reproduzierbaren Bedingungen an deren oberen Ende des typischen Einsatztemperaturbereiches von 150 °C messen zu können.

Die Schwachpunkte des bereits aus der Literatur [92-94] bekannten Prüfstandes, wozu besonders der eingeschränkte Einsatztemperaturbereich und die Stabilität der Mediumstemperatur zählen, wurden analysiert und werden im Folgenden durch eine Neukonzeption eines Sattedampf-Prüfstandes vermieden.

3. Konzeption und Aufbau des Prüfstandes

Ausgehend von der im vorherigen Kapitel ausgearbeiteten Auswahl eines auf Sattdampf basierenden Prüfstandes soll nunmehr die Konzeption sowie praktische Umsetzung dargestellt werden. Neben den gesetzten Anforderungen erfolgt zunächst ein Überblick über den realisierten Gesamtaufbau, bevor auf dessen gewählte Einzelkomponenten explizit eingegangen wird.

3.1 Anforderungen

Um einen geeigneten Prüfstand zu konzipieren, ist es zunächst nötig die Anforderungen konkret zu spezifizieren. Grundsätzliches Ziel ist dabei der messtechnische Vergleich verschiedener Rohranlegethermometer unter reproduzierbaren Bedingungen. Da der Prüfstand im Rahmen einer Kooperation entwickelt wurde, sollen folgende Eigenschaften erfüllt werden:

- autarke Messmöglichkeit mit integrierter Sicherheitsüberwachung
- möglichst großer Solltemperaturbereich
- Temperaturauflösung im einstelligen mK-Bereich
- Höchstmaß an Stabilität und Reproduzierbarkeit
- Minimierung von möglichen Störgrößen
- Automatisierbarkeit von Messabläufen
- Verwendung von verschiedenen Rohrdurchmessern, -oberflächen, -materialien und -geometrien
- einfacher Austausch von verschiedenen Prüfstreckenrohren
- Möglichkeit verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten mittels erzwungener Konvektion durch einen Lüfter im Bereich der Prüfstrecken zu erzeugen
- erzwungene Konvektion an jeder einzelnen Prüfstrecke möglich
- stabiler gleichzeitiger Betrieb mehrerer Prüfstrecken
- angesteuertes Zu-/Abschalten jeder Prüfstrecke
- Einsatz von kalibrierten Referenzsensoren
- integrierte Messdatenerfassung und -speicherung ohne zusätzlich erforderliche Peripherie
- Eignung für Dauerbetrieb sowie hohe Lebensdauer
- geringe Wartungskosten und leichte Wartbarkeit
- Einhaltung aller sicherheitstechnischen Anforderungen
- transportabler Aufbau
- geringe Gesamtkosten

3.2 Überblick über den Gesamtaufbau

Basierend auf der Auswahl im vorhergehenden Kapitel wurde ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut, welcher mit Sattdampf im Überdruckbereich von ca. 0,14 bar bis 4,0 bar arbeitet. Durch den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur (s. Anhang A1.5 bzw. [95]) ergibt sich dabei eine Mediumstemperatur im Bereich von ca. 100 °C bis ca. 150 °C.

Weiterhin besteht die Möglichkeit den Sattdampf in bis zu 8 Prüfstrecken zu leiten. Mittels eines Flanschsystems können dabei verschiedene Prüfstreckenrohre eingespannt werden, so dass unterschiedliche Rohranlegethermometer gleichzeitig gemessen werden können.

Der gesamte Prüfstand ist mittels Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik sicherheitstechnisch überwacht und kann in verschiedenen Einstellungskonfigurationen geregelt und betrieben werden. Weiterhin besteht die direkte Möglichkeit messtechnische Größen zu erfassen, weiterzuverarbeiten und abzuspeichern. So können auch bis zu 8 Rohranlegethermometern unmittelbar angeschlossen werden.

Die Abb. 3.1 bis Abb. 3.3 stellen den Gesamtaufbau aus verschiedenen Ansichtsperspektiven mit Kennzeichnung wesentlicher Komponenten anschaulich dar.

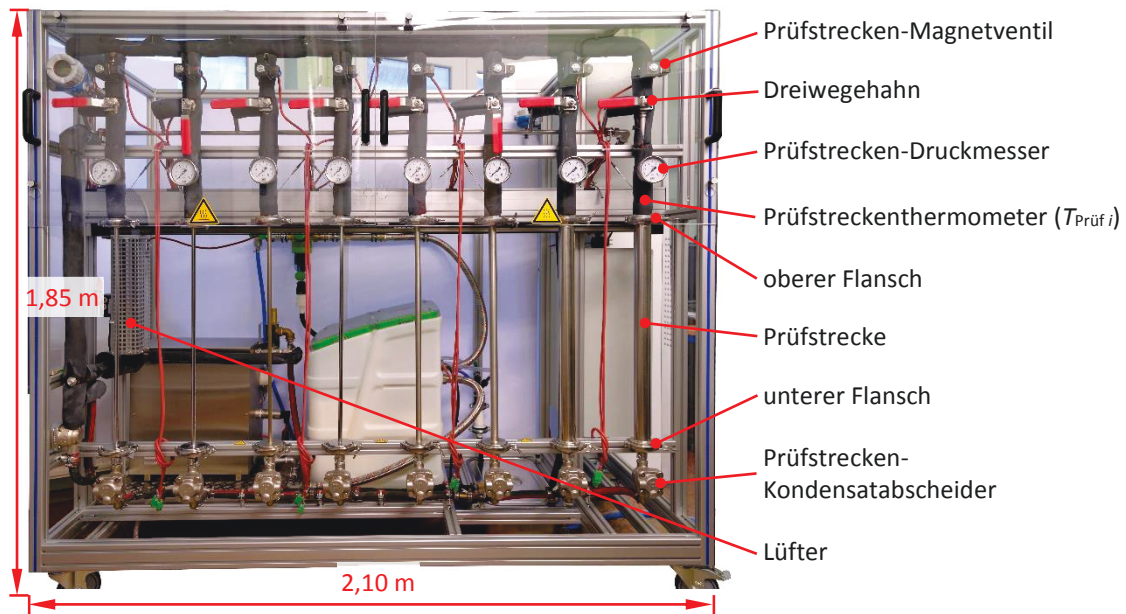


Abb. 3.1: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Vorderansicht

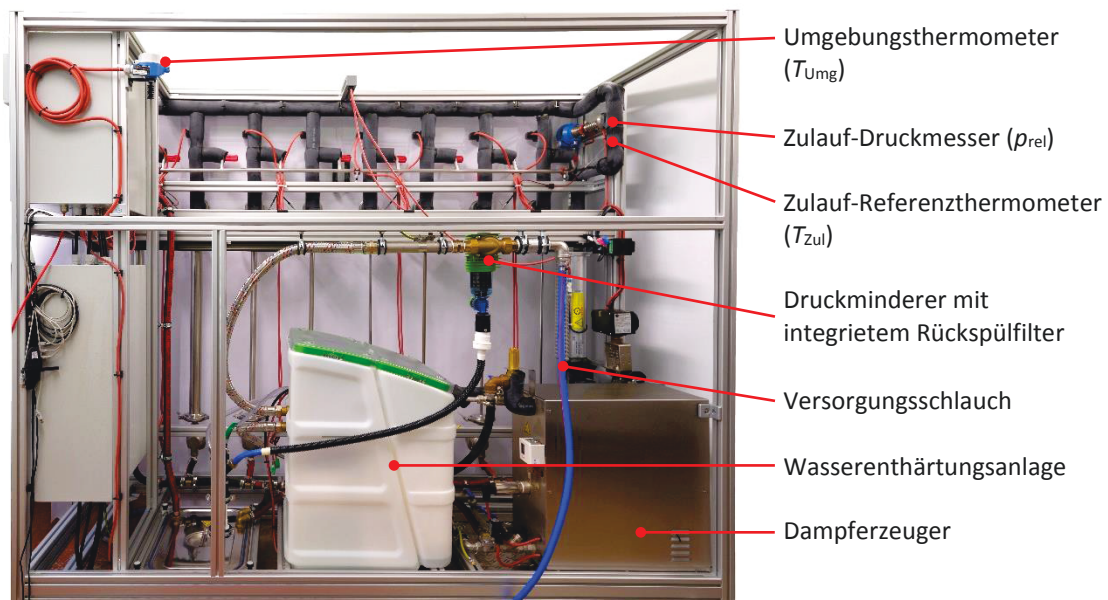


Abb. 3.2: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Rückansicht

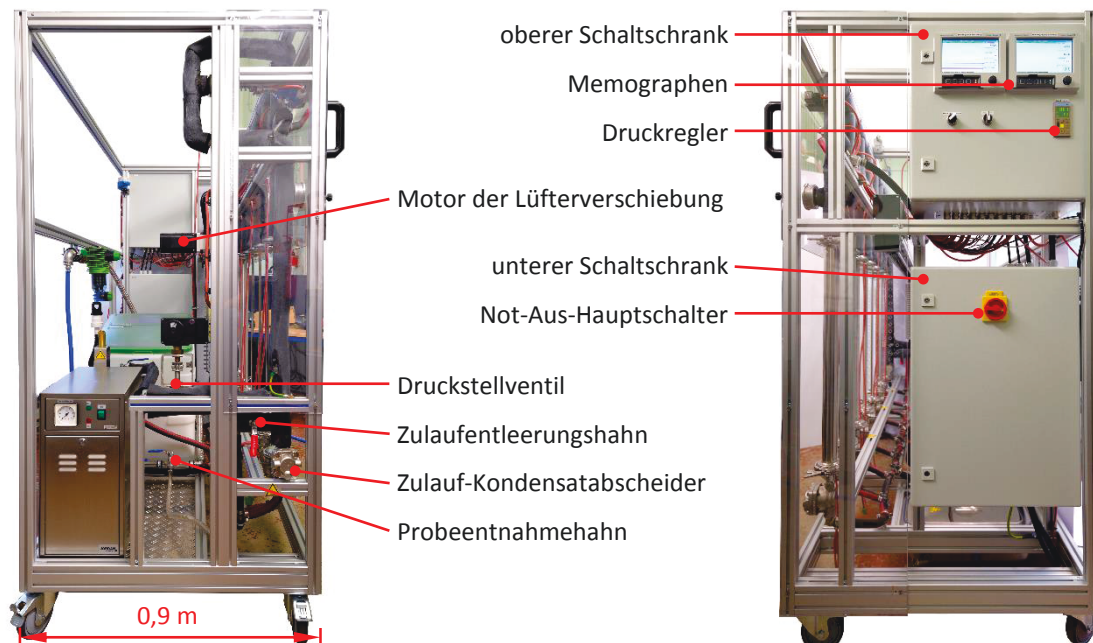


Abb. 3.3: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Seitenansichten

3.3 Medienverlauf

Im Folgenden wird, ausgehend von den verschiedenen Medien (Wasser bzw. -dampf, Energie und Steuerungssignale), der Verlauf durch die Anlagenteile grundlegend erläutert. Nähergehende Beschreibungen wesentlicher Einzelkomponenten werden im Kapitel 3.4 dargelegt.

3.3.1 Wasser und Sattedampf

Aus dem Installationsplan Abb. 3.4 kann zunächst der Medienverlauf von Wasser bzw. Sattedampf entnommen werden.

Ausgehend von einem bauseits vorhandenen Wasseranschluss wird das Trinkwasser mittels Versorgungsschlauch zum Prüfstand geführt. Durch den Hauptabsperrrhahn gelangt das Wasser in den Druckminderer mit integriertem Rückspülfilter, wodurch der Wasserdruck reduziert wird. Eine Reinigung des Filters erfolgt hierbei durch einen Abfluss des dabei entstehenden Abwassers in die Ablaufwanne. Weitergehend wird das Trinkwasser mittels einer Wasserenthärtungsanlage voll enthärtet. Das dabei auftretende Abwasser wird ebenfalls der Ablaufwanne zugeführt. Nach der Enthärtungsanlage kann zusätzlich, mittels des Probeentnahmehahns, das enthärtete Wasser überprüft bzw. für andere Zwecke entnommen werden. Weiterhin wird das enthärtete Wasser dem Dampferzeuger zur Verfügung gestellt. Neben dem eigentlichen Dampfausgang kann der Dampferzeuger mittels des Entleerungshahns des Dampferzeugers in die Ablaufwanne entleert werden. Zusätzlich wird über ein Sicherheitsventil Dampf in die Ablaufwanne abgeleitet, sollte es zu einem unzulässigen Überdruck des Dampferzeugers kommen. Der Sattedampf aus dem Dampfausgang wird durch das Druckstellventil auf den, mittels Druckregler eingestellten, Solldruck eingeregelt. Dem weiteren Verlauf des Sattedampfes folgend befinden sich als Abgänge neben dem Zulauf-Kondensatabscheider, welcher anfallendes Wasserkondensat der Ablaufwanne zuführt, der Zulauf-Entleerungshahn, mit welchem der Zulaufbereich zwischen Stellventil und den einzelnen Prüfstreckenabgängen druckfrei gemacht werden kann.

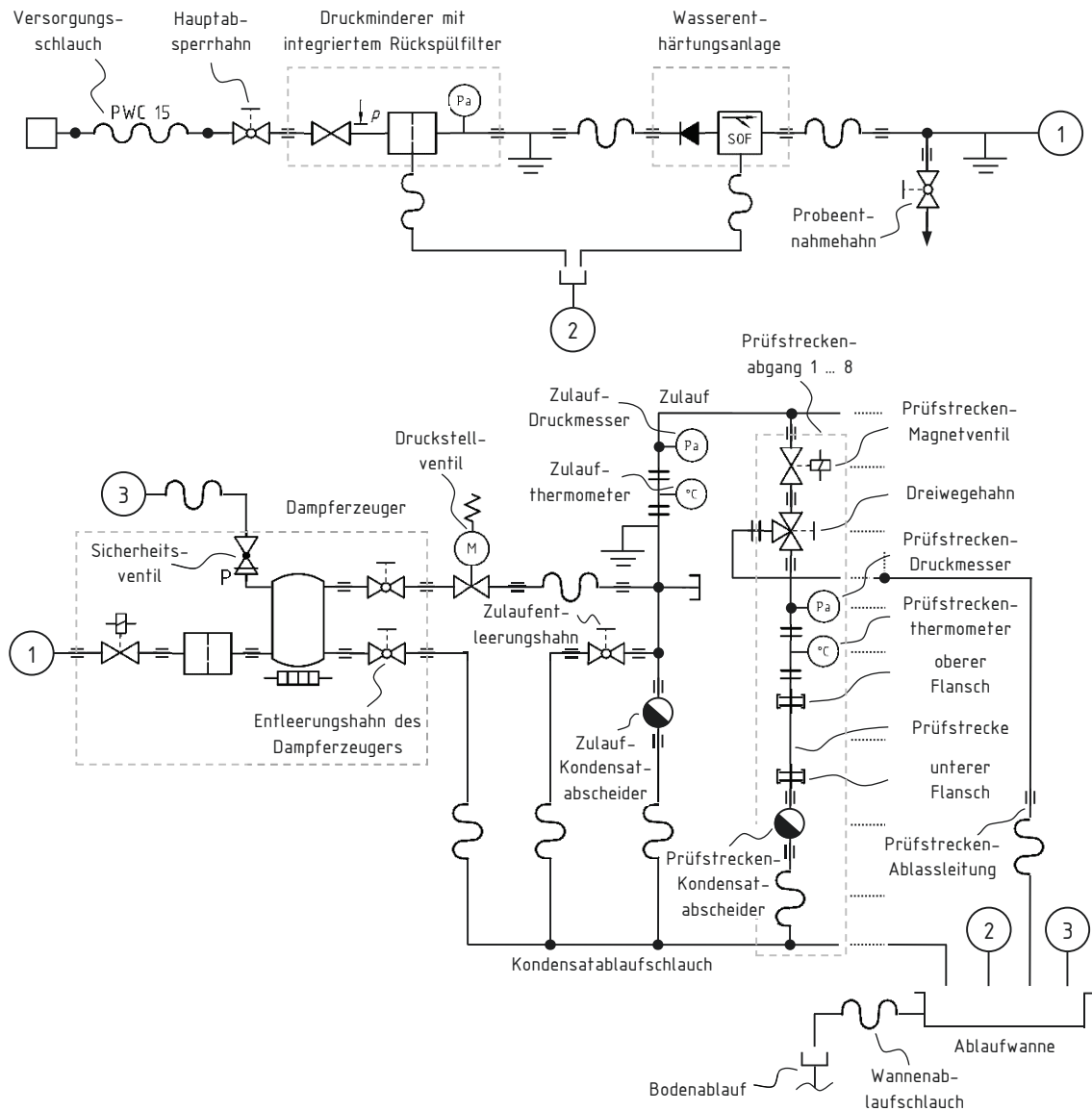


Abb. 3.4: Wasser- bzw. Sattdampfinstallationsschema, Symbole angelehnt an DIN EN806-1 [96]

Auch hierbei erfolgt die Entleerung in die Ablaufwanne. Vor dem Übergang des Sattdampfes auf die einzelnen Prüfstreckenabgänge befindet sich sowohl das Zulaufthermometer als auch der elektronische Zulauf-Druckmesser, welcher den Ist-Druckwert für den Druckregler liefert. Nachgeschaltet sind nunmehr 8 Prüfstreckenabgänge, welche alle identisch aufgebaut sind. Jeder dieser Abgänge besitzt zunächst ein zuschaltbares Prüfstrecken-Magnetventil, gefolgt von einem Dreiwegehahn. Im normalen Betriebsfall leitet dieser den Sattdampf weiter auf den mechanischen Prüfstrecken-Druckmesser sowie das Prüfstreckenthermometer. Zur Druckfreimachung der Prüfstrecke kann der Dreiwegehahn so umgelegt werden, dass er in Richtung Zulauf gesperrt wird und gleichzeitig eine Verbindung der Prüfstrecke zur Ablaufwanne über die Prüfstrecken-Ablassleitung herstellt. Die eigentliche Prüfstrecke wird mittels 2 Klemmring-Flanschen (oberer und unterer Flansch) eingebunden. Das im Bereich der Prüfstrecke anfallende Kondensat wird mittels des Prüfstrecken-Kondensatabscheiders über den Kondensatablaufschauch der Ablaufwanne zugeführt. Die Ablaufwanne verfügt selber über einen Wannenablaufschauch, welcher in einen Bodenablauf geführt ist.

3.3.2 Energie und Steuerungssignale

Die wichtigen Hauptkomponenten der Energie- und Steuerungstechnik sind als Übersichts-
schema in Abb. 3.5 vereinfacht dargestellt.

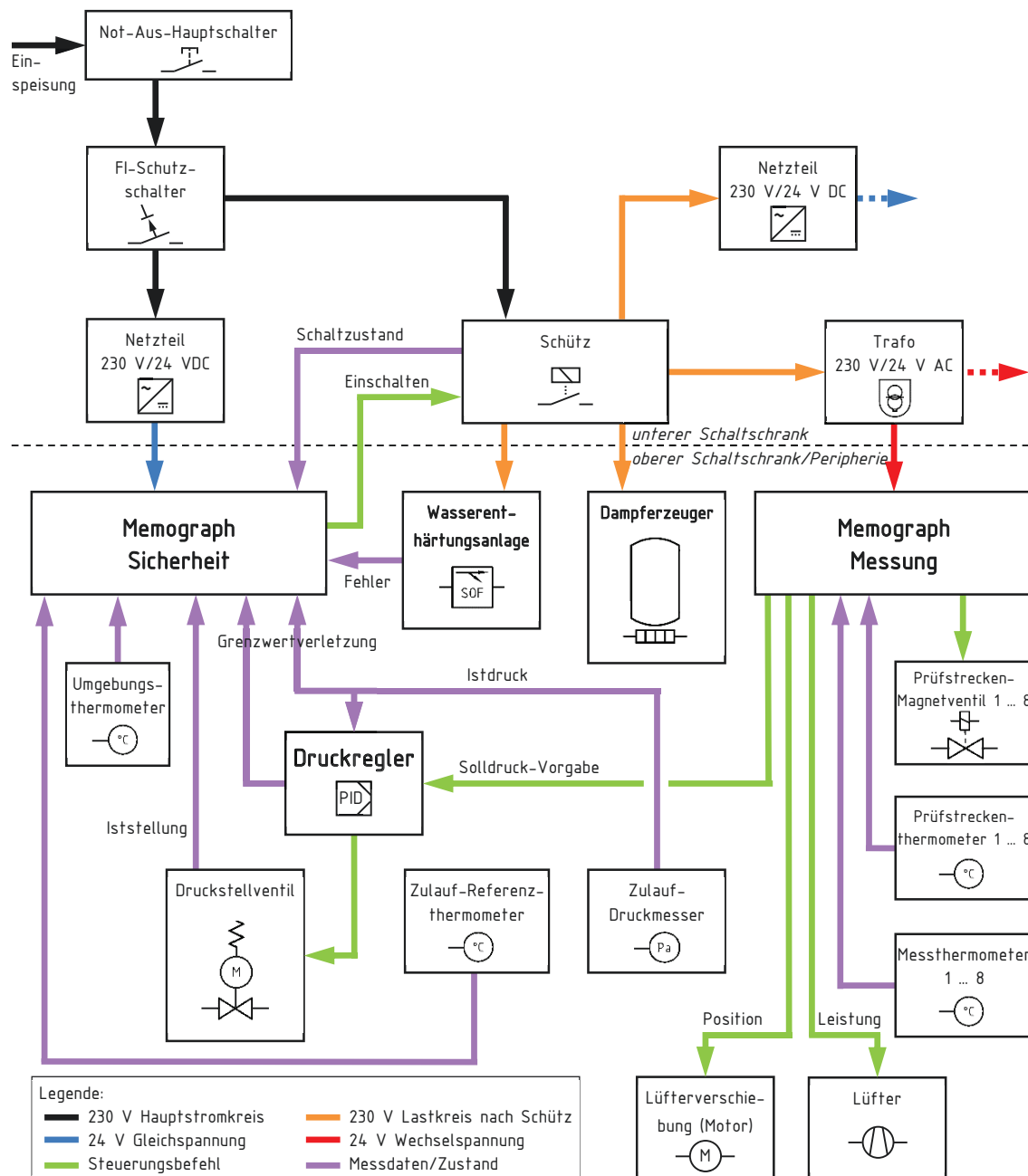


Abb. 3.5: Hauptkomponenten der Energie- und Steuerungstechnik (vereinfachte Darstellung)

Nachfolgend wird der Strom- bzw. Signalverlauf kurz erläutert:

Es erfolgt zunächst eine 3-phasige Netzeinspeisung in den Prüfstand. Durch den Not-Aus-Hauptschalter erfolgt das Ein-/Ausschalten der gesamten Spannungsversorgung des Prüfstands. Dem Stromverlauf folgend befindet sich ein FI-Schutzschalter, der ebenfalls für die gesamte Anlage wirksam ist. Alle anschließenden Stromkreise sind einzeln mittels Leitungsschutzschaltern (in Abb. 3.5 nicht dargestellt) abgesichert. Über ein eigenes Netzteil 230 V/24 V DC wird der sogenannte Memograph Sicherheit versorgt. Dieses Gerät

überwacht alle im Prüfstand vorhandenen Sicherheitsfunktionen. Im Fehlerfall oder bei Ausfall des Memograph Sicherheit ist das Schütz stets geöffnet und im normalen Betriebszustand geschlossen. Im letztgenannten Fall wird somit das Netzteil 230 V/24 V DC, der Trafo 230 V/24 V AC, die Wasserenthärtungsanlage und der Dampferzeuger mit Spannung versorgt. Der Memograph Messung dient, wie der Memograph Sicherheit, vornehmlich der Messwerterfassung, -speicherung und -anzeige sowie Regelung. Hierbei können die verschiedenen Prüfstrecken mittels der Prüfstrecken-Magnetventile einzeln zu- bzw. abgeschaltet werden. Eine Erfassung der Temperaturen im Bereich der Prüfstrecken erfolgt mittels der Prüfstrecken- und Messthermometer. Für eine erzwungene Konvektion im Bereich der Prüfstrecken kann ein Lüfter in mehreren Leistungsstufen hinzugeschaltet und mittels der Lüfterverschiebung motorisch zwischen den einzelnen Prüfstrecken verfahren werden. Weiterhin kann am Memograph Messung der Solldruck für den Druckregler vorgegeben werden, welcher wiederum das Druckstellventil ansteuert. Der Druckregler nutzt hierbei den Istüberdruck des Zulauf-Druckmessers. Neben den Temperaturen des Umgebungs- und Zulaufthermometers überwacht der Memograph Sicherheit auch die Iststellung des Druckstellventils, Grenzwertverletzungen des Druckreglers, den Istüberdruck des Zulauf-Druckmessers, Fehler der Wasserenthärtungsanlage und den Schaltzustand des Schützes.

3.4 Auswahl und Eigenschaften wesentlicher Einzelkomponenten

3.4.1 Wasserenthärtungsanlage

Sowohl ein mögliches Verkalken des Dampferzeugers als auch ein Mitführen von Kalkpartikeln im Sattedampf sowie dessen Ablagerung an den Rohrrinnenwänden des Prüfstandes sind in jedem Fall zu vermeiden. Insbesondere die als Kesselstein bekannten Ablagerungen können zu einer deutlichen Verschlechterung des Wärmeübergangs zwischen dem Sattedampf und der Rohrrinnenwand der Prüfstreckenrohre führen, da sich eine zusätzliche Schicht mit einer vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit von 0,08 W/(m K) bis 2,3 W/(m K) [50] im Rohrrinnen ausprägen kann. Weiterhin ist am Aufstellungsort des Prüfstandes mit einer mittleren Wasserhärte bis 10 °dH [97] zu rechnen.

Aus diesen Gründen kommt zur Aufbereitung des Zulaufwassers eine Enthärtungsanlage zum Einsatz. Hierzu wurde eine Anlage mit 2 Ionenaustauschern ausgewählt (Grünbeck GSX 5, s. [98]), welche die Calcium- und Magnesiumionen gegen Natriumionen ersetzt. Dadurch, dass jeweils nur ein Austauscher in regelmäßigen Abständen bzw. nach Wasserverbrauch automatisch mit Sole gespült wird, ist die Versorgung mit vollenthärtetem Wasser für den Dampferzeuger stets gegeben. Die dafür notwendigen Salztabletten werden in einem integrierten Behälter zur Verfügung gestellt.

3.4.2 Dampferzeuger

Der Dampferzeuger stellt das Kernstück des Prüfstandes dar. In Anbetracht der kleinen Volumengröße in der Prüfstandsverrohrung und die ausschließlich durch die Kondensatabscheider verursachten geringen Druck- bzw. Dampfverluste werden nur geringe Dampfmenngen benötigt. Eine überschlägliche Ermittlung liefert hierbei eine zu erwartende

Kondensatmenge von ca. 0,45 l/h pro Prüfstrecke, was einer max. notwendigen Dampfmenge bei Betrieb aller 8 Prüfstrecken von etwa 3,6 kg/h entspricht. Typischerweise kommen in diesem Fall Elektrodampfkessel zum Einsatz, wobei hier ein Dampferzeuger mit einer elektrischen Heizleistung von 3 kW verwendet wird (Jordan Mod. 21.100.03, s. [99]). Die maximale Dampfleistung beträgt 4 kg/h [99].

Folgend sei die Funktionsweise des Gerätes erläutert: Nach Einschalten des Dampferzeugers wird durch das Dampferzeuger-Magnetventil dem Kessel solange Wasser zugeführt, bis dessen Niveaustand das Maximum erreicht hat. Das Kesselwasser wird dabei durch die Kesselheizung soweit erwärmt, dass Sattdampf entsteht. Durch das nahezu geschlossene System des Prüfstands können hierbei Überdrücke bis zu 5 bar entstehen. Bei letztgenanntem Überdruck schaltet der Druckschalter das Gerät solange ab, bis der Druck wieder sinkt. Aufgrund von geringen Druckverlusten durch die Kondensatabscheider und Kondensation des Sattdampfes in den Rohrleitungen nimmt auch der Überdruck im Kessel ab. Der Niveaustand erreicht somit das Minimum und das Dampferzeuger-Magnetventil führt dem Kessel wieder neues Wasser zu.

3.4.3 Druckstellventil

Der gewünschte Solldruck kann nicht direkt im Dampferzeuger eingeregelt werden, da dieser immer auf den max. Überdruck von ca. 5 bar regelt. Aus diesem Grund dient das Druckstellventil der Einstellung eines, durch den Druckregler bzw. Memograph Messung vorgegebenen, wählbaren Sollüberdruckes. Aufgrund der verwendeten kleinen Rohrquerschnitte, der geringen zu erwartenden Reglerdynamik sowie Kosten kommt ein Stellventil mit elektromotorischen Antrieb (Samson 5825, s. [100]) zum Einsatz. Dieses System wurde auf den benötigten Einsatzzweck hin parametrisiert und optimiert. Aus Sicherheitsgründen besitzt das Druckstellventil zudem eine Sicherheitsstellung gemäß DIN EN 14597 [101], so dass dieses bei einem Stromausfall stets geschlossen ist und kein weiterer Sattdampf mehr in die Zuleitung sowie Prüfstrecken gelangen kann.

3.4.4 Zulauf- und Prüfstreckenthermometer

Bei den Zulauf- sowie Prüfstreckenthermometern handelt es sich um kalibrierte vorgealterte Thermometer mit Pt100-Glasmesswiderständen (\varnothing : 1,1 mm, Länge: 10 mm), welche abgewinkelt so in ein Rohrstück eingeführt sind, dass sich der sensitive Teil des Pt100 auf der Rohrachse befindet. Durch eine Eintauchlänge von ca. 40 mm und mittels eines kleinen Durchmessers der Mantelleitung (ca. 1,5 mm) ergibt sich ein Verhältnis von Eintauchlänge zu Durchmesser von ca. 26. Entsprechend [102, Gl. 4.10] (Forderung: > 20) kann somit der Wärmeableitfehler an die Umgebung vernachlässigt werden. Die Vorteile der Eintauchlänge und des kleinen Durchmessers können sonst übliche kommerziell erhältliche Thermometerbauformen mit Schutzrohrarmaturen, insbesondere bei dem verwendeten kleinen Rohrdurchmesser, nicht bieten. Weiterhin wirken ein hoher Wärmeübergangskoeffizient (zwischen Medium und Rohrrinnenwand) des Sattdampfes sowie die spätere thermische Isolierung des Rohrstücks dem Wärmeableitfehler entgegen.

In Abb. 3.6 ist das Thermometer wasserdicht eingelötet in das Rohrstück zu sehen. Die Montage am Prüfstand erfolgte dann mit Hilfe von 2 Schneidringverschraubungen, wobei eine spätere Demontage und erneute Kalibrierung des Rohrstücks mitsamt dem Thermometer ermöglicht wird.

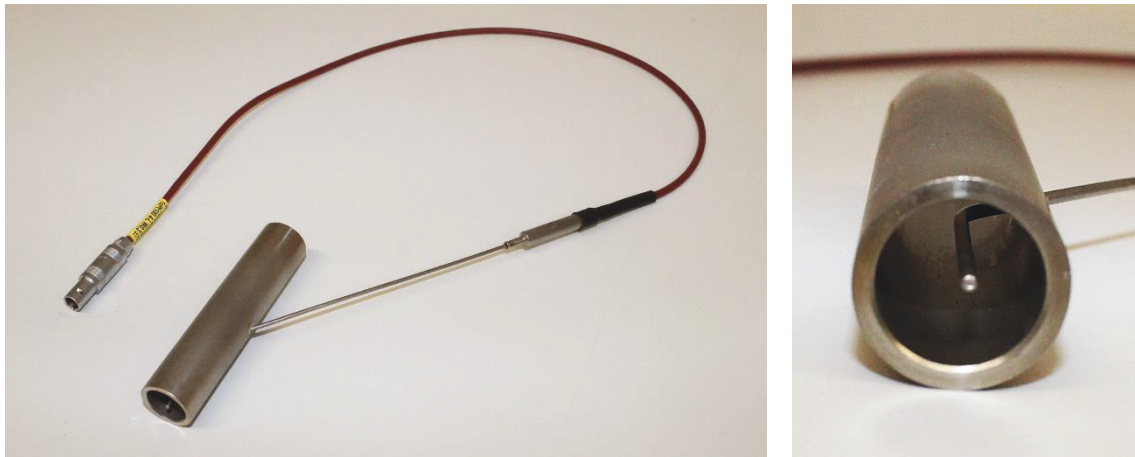


Abb. 3.6: Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer vor der Montage, Rohrrinnendurchmesser: 14 mm, Rohraußendurchmesser: 18 mm

Das Zulauf- sowie alle 8 Prüfstreckenthermometer sind identisch aufgebaut und dienen als Referenz für eine Messung der Mediumtemperatur direkt auf der Rohrachse. Während sich das Zulaufthermometer in unmittelbarer Nähe zum Druckmesser befindet, liegen die Prüfstreckenthermometer mit ihrem Sensor nach unten zeigend (wie in Abb. 3.6 rechts dargestellt) im direkten Bereich des oberen Flansches und somit unmittelbar vor den jeweiligen Prüfstrecken.

3.4.5 Zulauf-Druckmesser

Der Zulauf-Druckmesser dient der Aufnahme des relativen Zulaufdrucks p_{rel} vor den einzelnen Prüfstreckenabgängen. Die Auswahl fiel hierbei auf einen elektrischen Druckmesser mit integriertem 4 – 20 mA-Messumformer (Endress+Hauser Cerabar M PMP55, s. [103]), so dass seine Istwerte sowohl für den Druckregler als auch für den Memograph Sicherheit verwendet werden können. Zum Schutz vor der hohen Mediumtemperatur sowie möglichen Druckschlägen kommt ein Druckmittler mit Temperaturentkoppler zum Einsatz. Dies ermöglicht zusätzlich eine temperaturunabhängigere Messung. Mittels seiner Werkskalibrierung ist der Zulauf-Druckmesser rückführbar kalibriert.

Durch die unmittelbare Nähe zur Messstelle des Zulaufthermometers kann bei Kenntnis des atmosphärischen Drucks auch der Zusammenhang zwischen dem Zulaufdruck und der Mediumtemperatur hergestellt bzw. überprüft werden (vgl. Kap. 4.1.3).

3.4.6 Prüfstrecken

Mit Hilfe der Prüfstrecken können Messungen von Rohranlegethermometern an verschiedenen Rohrdurchmessern, -oberflächen, -materialien und -geometrien vorgenommen werden. Die feste Verrohrung des Prüfstands weist zur Aufnahme der Prüfstrecken Flansche nach DIN 11853-3 [104] auf. Dadurch, dass die Prüfstrecken ebenso mit einem unteren und oberen Gegenflansch sowie Dichtungen versehen sind, werden die gegeneinanderstehenden Flansche jeweils mittels einer Klemmklammer dicht befestigt. Eine leichte werkzeuglose Entnahme bzw. Anbringung der Prüfstreckenrohre in die feste Verrohrung des Prüfstands wird somit ermöglicht.

Ausgehend von dem im Industrie-, Pharmazie- und Lebensmittelbereich vorherrschenden rostfreien Edelstählen sollen diese für die Prüfstrecken als Rohrmaterial gleichsam

Verwendung finden. Da der Werkstoff X2CrNiMo18-14-3 (1.4435) laut DIN 11866 [66] als Standardwerkstoff für Rohrleitungssysteme in der Aseptik, Chemie und Pharmazie aufgeführt wird, kommt dieser für alle Prüfstreckenrohre zum Einsatz. An dieser Stelle sei nicht unerwähnt, dass sich die Wärmeleitfähigkeit entsprechend des VDI-Wärmeatlas [50] nicht wesentlich zwischen den unterschiedlichen rostfreien Stählen unterscheidet. Um eine mögliche Korrosion auszuschließen, ist die übrige sattdampfführende Verrohrung aus rostfreien Edelstählen gleicher oder ähnlicher Güte gefertigt. Andere Rohrmaterialien können jedoch ebenso verwendet werden.

Für die Rohrdurchmesser wurde sich an kleinen Rohrdurchmessern für die Messungen mit Rohranlegethermometern orientiert, da diese häufig in der Praxis Verwendung finden (vgl. Kap. 2.1.1). In der DIN 11866 [66] werden 3 unterschiedliche Rohrreihen, eingeteilt nach ihrer Nennweite, genannt. Die Spanne des Außendurchmessers reicht dabei von 6,35 mm (DN ¼") bis 219,10 mm (DN 219,1) [66]. Durch entsprechende Auslegung der Flansche der festen Verrohrung des Prüfstands können Prüfstreckenrohre von DN ¼" bis DN 60,3 genutzt werden. Aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten wurde sich zunächst auf die Reihe C nach DIN 11866 [66] beschränkt und DN ½", DN ¾", DN 1" sowie DN 2"-Prüfstrecken aufgebaut, wobei der Fokus für nachfolgende Messungen auf den DN ½"-Prüfstrecken liegen soll. Tab. 3.1 gibt die vorhandenen Prüfstreckenrohre des Prüfstands übersichtlich wieder. Die Rohrlänge ohne Einbeziehung der Flansche beträgt bei allen Varianten 700 mm und bietet ausreichend Platz zur Befestigung mehrerer Rohranlegethermometer.

Tab. 3.1: Übersicht der vorhandenen Prüfstreckenrohre, Werkstoff: 1.4435, Länge: 700 mm

Prüfstrecken-nummer	Nennweite nach DIN 11866	Außendurchmesser in mm	Innendurchmesser in mm	Oberflächenbearbeitung
1	½"	12,70	9,40	metallblank
2	½"	12,70	9,40	metallblank
3	½"	12,70	9,40	glasperlengestrahlt
4	½"	12,70	9,40	elektropoliert
5	¾"	19,05	15,75	metallblank
6	1"	25,40	22,10	metallblank
7	2"	50,80	47,50	metallblank
8	2"	50,80	47,50	metallblank

In der DIN 11866 [66] wird die Oberflächenbeschaffenheit von Rohren nur an deren innerer Oberflächenrauigkeit festgemacht und in verschiedene Hygieneklassen eingeteilt. Für die äußere Oberflächenrauigkeit werden, mit Ausnahme von geschliffenen Oberflächen (axialer Mittenrauwert $Ra < 1 \mu\text{m}$ [66]), keine Rauheitsvorgaben gestellt. Da die Oberflächenrauheit jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Messung mit Rohranlegethermometern haben kann und dies näher untersucht werden soll, wurde neben der metallblanken auch eine glasperlengestrahlte sowie elektropolierte Oberflächenbearbeitung der ansonsten identischen DN ½"-Prüfstreckenrohre vorgenommen.

Die Anordnungen aller Prüfstrecken erfolgt lotrecht, so dass ablaufendes Kondensat stets ungehindert abfließen kann.

Zusätzlich zu den vorgenannten Prüfstrecken existiert noch eine weitere Variante mit vorspringendem gebeizten Prüfstreckenrohr sowie der Möglichkeit ein Thermometer hindurchzuschieben, diese spezielle Bauform wird im nachfolgendem Kap. 3.4.7 nähergehend

beschrieben. Eine Erweiterbarkeit mit anderen Prüfstreckenordnungen ist durch das benutzte Flanschsystem mit austauschbaren Prüfstrecken jederzeit möglich.

3.4.7 Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer

Eine besondere Bauform der Prüfstreckenrohre stellt die Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer dar. Mittels Fitting ist die Verrohrung der Prüfstrecke so ausgeführt, dass durch ein T-Stück mit Stopfbuchseneinsatz ein Thermometer in einem geheizten ca. 538 mm langen DN ½"-Rohr durchgeschoben werden kann. Das verwendete Thermometer mit einem Durchmesser von 1,5 mm beinhaltet einen vorgealterten Pt100-Glasmesswiderstand der höchsten Genauigkeitsklasse W 0,1 nach DIN EN 60751 [47] und wurde vor Einsatz kalibriert. Durch 2 angelötete kreuzförmige Abstandhalter befindet sich die Thermometerspitze innerhalb des Rohrs stets auf der Rohrlängsachse und ermöglicht somit eine Messung der Mediumtemperatur an allen Positionen entlang der Rohrlängsachse. Abb. 3.7 zeigt sowohl die gesamte Prüfstrecke als auch das verwendete Thermometer vor seiner Montage.



Abb. 3.7: Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer (links), Detailansicht des Thermometers mit angelöteten Abstandhaltern vor Montage im DN ½"-Rohr (rechts)

Schlussfolgernd kann mit dieser Prüfstrecke nunmehr auch die Mediumtemperatur auf der Rohrlängsachse als Referenz für ein im unmittelbaren Rohrbereich angebrachtes Rohranlegethermometer bestimmt werden (s. Kap. 4.2.2).

3.4.8 Zulauf- und Prüfstrecken-Kondensatabscheider

Zur Abscheidung des sich an der Verrohrungsinnenwand ausbildenden Wasserkondensats sowie zur Entlüftung zu Beginn jeder Benutzung des Prüfstands dienen die Zulauf- und Prüfstrecken-Kondensatabscheider. Gemäß [105] können dabei 3 Arten unterschieden werden: mechanische, thermostatische und thermodynamische Kondensatabscheider. Zum Einsatz kommt hier ein Kondensatabscheider (TLV SS1, s. [106]), welcher nach dem Frei-Schwimmer-Prinzip (vgl. [107]) mit einer Schwimmerkugel arbeitet. Dadurch erfolgt eine kontinuierliche Kondensatabscheidung unabhängig von Druckschwankungen oder Gegendruck [107]. Neben einem eingebauten Schmutzfänger ist auch ein Bimetall-Entlüfter integriert, so dass besonders in der Anfahrphase des Prüfstandes Luft sowie Kondensat schnell entweichen können.

Durch die Anordnung der Kondensatabscheider unmittelbar unterhalb jeder einzelnen Prüfstrecke wird ein möglicher Kondensatrückstau wirksam unterbunden und gleiche Bedingungen für alle Prüfstreckenabgänge geschaffen.

3.4.9 Druckregler

Der Druckregler ist das entscheidende Glied für eine stabile Regelung auf einen gewünschten Sollüberdruck. Auf dem Markt ist eine schier unüberschaubare Anzahl von PI(D)-Reglern erhältlich. Es wurde daher ein PID-Druckregler (Samson Trovis 6493, s. [108]) gewählt, welcher bereits für elektromotorische Stellantriebe optimiert ist, über eine hohe Auflösung verfügt, eine externe Sollwertvorgabe ermöglicht und einen industriensicheren Betrieb ermöglicht. Über eine optische Schnittstelle lässt sich der Regler zudem mittels eines PC vergleichsweise einfach parametrisieren.

Mittels des Druckreglers wird der Hub des Druckstellventils so eingeregelt, dass sich der gewünschte Sollüberdruck im Zulauf des Prüfstandes einstellt. Der Sollüberdruck wird dabei mit Hilfe des Memograph Messung eingestellt. Als Istüberdruck werden die Messwerte des Zulauf-Druckmessers genutzt. Durch experimentelle Bestimmung wurden die einzelnen Reglerparameter (s. Kap. 4.1.1) dahingehend optimiert, dass ein möglichst stabiler Betrieb mit geringen Schwankungen des Istüberdruckes im Prüfstand über den gesamten Druckbereich gewährleistet ist.

3.4.10 Memographen

Zur Überwachung der Systemsicherheit, Steuerung und der Messwerterfassung, -speicherung sowie -anzeige müssen geeignete Komponenten gefunden werden, die neben einer Vielzahl von Ein- bzw. Ausgängen hohe Messkanalaufösungen mit geringen Messunsicherheiten ermöglichen. Typischerweise werden dazu in der Industrie speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) mit entsprechenden Erweiterungsmodulen eingesetzt. Ein Nachteil ergibt sich hierbei insbesondere bei den verfügbaren Analogeingangsmodulen, die häufig nur eine 16 Bit-Auflösung ermöglichen, wie bspw. bei dem entsprechenden Modul [109] der häufig anzutreffenden SPS Siemens Simatic S7. Dabei wird eine Auflösung von umgerechnet lediglich 32 mK erreicht, was angesichts der gestellten Anforderungen an den Prüfstand mit einer Auflösung im einstelligen mK-Bereich zu gering ist. Eine Abhilfe konnte durch den Memograph M RSG45 der Firma Endress+Hauser Wetzlar gefunden werden, welcher eine berechnete Auflösung von kleiner als 0,13 mK bei vergleichsweise geringen Messunsicherheiten erreicht (vgl. [110]). Neben einer grafischen Anzeige und erweiterten Sicherheitsfunktionen besitzt das Gerät auch die Möglichkeit alle Mess- sowie Konfigurationsdaten direkt auf eine SD-Karte kontinuierlich zu speichern. Durch Modularisierung mit verschiedenen Ein- bzw. Ausgangskarten kann dieses Gerät zudem auf die gestellten Bedürfnisse vergleichsweise einfach angepasst werden. Insgesamt kommen aufgrund der jeweils begrenzten Anzahl von Schnittstellen sowie zur Erhöhung der Sicherheit des Prüfstandes 2 Geräte zum Einsatz.

Zum einen ist dies der sogenannte Memograph Messung, über welchen alle Konfigurationen, wie bspw. Sollüberdruck, Lüfterleistung, Prüfstrecken-Zuschaltung etc., entsprechend der Messanforderungen direkt geändert werden können. Er fungiert u. a. zur Messwertaufnahme aller 8 Prüfstreckenthermometer. Weiterhin stehen zum Anschluss von Rohranlegethermometern oder anderen Widerstandsthermometern insgesamt 8 Messkanäle in 4-

Leiterschaltung zur Verfügung. Über eine LAN-Schnittstelle kann er zusätzlich zur manuellen Gerätebedienung auch mittels PC ferngesteuert werden.

Zum anderen dient der stets autark arbeitende Memograph Sicherheit der Überwachung aller sicherheitskritischen Messwerte und schaltet im Fehlerfall alle kritischen Bereiche des Prüfstands ab.

Abb. 3.5 stellt schematisch wesentliche Funktionen beider Memographen dar.

3.4.11 Lüfter und Lüfterverschiebung

Der im Prüfstand vorgesehene Lüfter kann zur erzwungenen Luftkonvektion im Bereich der Prüfstrecken eingesetzt werden. Dies dient bspw. dazu, eine Störgröße in der Umgebung der Prüfstrecken zu erzeugen und somit eine Messung mit Rohranlegethermometern gezielt zu beeinflussen. Um einen großen axialen Bereich der Prüfstrecke einer möglichst gleichmäßigen Luftströmung auszusetzen, wurde ein Querstromventilator (LTG TA, s. [111]) gewählt, dessen Drehzahl zudem über einen 0 – 10 V-Analogeingang geregelt werden kann. Am Memograph Messung können aus Anschlussgründen nur 4 verschiedene Leistungsstufen mit 20 %, 50 %, 65 % und 100 % der maximalen Abgabeleistung des Lüfters von ca. 55 W [111] eingestellt werden. Der maximal erzielbare Volumenstrom beträgt laut Herstellerangabe ca. 510 m³/h [111], wodurch auch größere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden können. Eine Übersicht der erzielbaren Strömungsgeschwindigkeiten findet sich in Kap. 4.2.4.

Mit Hilfe einer Lüfterverschiebung, welche auf einer motorisch angetriebenen Linearführung basiert, kann der Lüfter zwischen den einzelnen Prüfstrecken verfahren werden. Die Lüfterverschiebung ist dabei so programmiert, dass sie entweder manuell über einen Wahltaster über den gesamten Bewegungsbereich verfahren oder aber durch Prüfstreckenauswahl im Memograph Messung und automatische Anfahrt der entsprechenden Prüfstrecke genutzt werden kann. Nach jedem Einschalten des Prüfstands wird zur Positionsreferenzierung ein automatisches Abfahren über den vollen Bewegungsbereich initiiert, so dass ein reproduzierbares Anfahren einer bestimmten Prüfstrecke ermöglicht wird.

3.4.12 Klimadatenlogger

Zur Messung des atmosphärischen Drucks im Raum kommt ein Klimadatenlogger (Comet T7610, s. [112]) zum Einsatz. Mit Hilfe seines gemessenen atmosphärischen Drucks und relativen Zulaufdrucks kann somit der absolute Zulaufdruck bestimmt werden (vgl. Kap. 4.1.3). Weiterhin besteht die Möglichkeit die relative Feuchte sowie die Umgebungstemperatur an einer anderen Messstelle im Umfeld des Prüfstandes zu messen. Hierbei ist der Klimadatenlogger unmittelbar mittig oben hinter dem Prüfstand an der Raumwand montiert. Laut Kalibrierschein [113] beträgt die erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor $k = 2$) 0,28 hPa für den atmosphärischen Druck, 1,3 % für die relative Feuchte und 0,14 K für die Umgebungstemperatur.

3.5 Ansteuerungs-, Mess- und Auswertemöglichkeiten

Zusammenfassend können folgende softwareseitigen Konfigurationen direkt am Prüfstand (Memograph Messung) eingestellt werden:

- Sollüberdrücke von ca. 0,14 bar bis 4,0 bar, dies entspricht einem Mediumtemperaturbereich des Sattdampfes von 100 °C bis maximal 150 °C
- Zu-/Abschaltung jeder einzelnen Prüfstrecke
- Position der Lüfterverschiebung: manuell oder auf gewünschte Prüfstrecke
- Lüfterleistung in 5 Stufen: aus, 20 %, 50 %, 65 % oder 100 %

Um den Prüfstand weitergehend zu automatisieren und somit umfangreiche Messreihen ohne manuellen Benutzereingriff zu ermöglichen, wurde in MathWorks Matlab ein PC-Programm erstellt, mit welchem beliebig vorzugebene Sollüberdrücke und Lüfterleistungen mit definierten Zeitabläufen inkl. notwendiger Einschwingzeiten gefahren werden können. So kann bspw. eine auf- und absteigende Temperierung von an einer Prüfstrecke angekoppelten Rohranlegethermometern mit allen Lüfterleistungen vergleichsweise einfach sequentiell vom Prüfstand abgearbeitet werden. Aus Sicherheitsgründen werden die Befehle periodisch vom PC an den Memograph Messung gesendet, so dass bei einem Ausfall des PC's der Memograph Messung dies automatisch erkennt und in einen sicheren Betriebszustand übergeht.

Nach jeder Messreihe können die dabei entstandenen Daten in den Memographen ausgewählt und mittels SD-Karte oder USB-Stick auf einen PC übertragen werden. Zusätzlich erfolgt eine kontinuierliche Speicherung sämtlicher Daten auf die SD-Karten der Memographen, so dass auch eine Datenrekonstruktion ermöglicht wird. Zur anschließenden Auswertung wurde in MathWorks Matlab ein Programm geschrieben, welches sämtliche Daten der beiden Memographen sowie des Klimadatenloggers zusammenfasst. Durch integrierte Kalibrierdatensätze für am Prüfstand bereits verwendete Thermometer erfolgt automatisch eine Korrektur. Weiterhin können Messbereiche teilautomatisiert ausgewählt werden, auf deren Grundlage eine bereichsweise Statistik erstellt wird. Sämtliche Daten werden abschließend in einem objektbezogenen Verbund abgespeichert und können somit jederzeit ohne erneutes Einlesen weiterverarbeitet werden.

4. Verifizierung des Prüfstandes

Bevor Untersuchungen von Rohranlegethermometern mit Hilfe des Prüfstandes vorgenommen werden können, sind dessen charakterisierende Eigenschaften sowie Leistungsfähigkeit zu quantifizieren und verifizieren, was in diesem Kapitel detailliert dargelegt werden soll.

4.1 Allgemeine Betrachtungen

4.1.1 Reglerparametrisierung

Von entscheidender Bedeutung für den Prüfstand ist die optimierte Parametrisierung des Druckreglers. Ohne diese können keine stabilen Druck- bzw. Temperaturverhältnisse, insbesondere in den Prüfstrecken, erreicht werden. Dies ist insofern essentiell, da für die späteren Messungen mit Rohranlegethermometern eine Mediumstemperatur mit geringer Streuung unabdingbar ist. Dabei ist zu beachten, dass im Druckregler (vgl. [108]) nur ein Parametersatz hinterlegt werden kann. Ein selektiver Regler mit verschiedenen Parametern über bspw. mehrere Überdruckbereiche kann somit nicht aufgebaut werden. Weiterhin besteht die Anforderung, dass der Druckregler auch mit verschiedenen Lastfällen, d. h. mehreren gleichzeitig durchströmten Prüfstrecken, stabil funktionieren muss. Im oberen Einsatztemperaturbereich des Prüfstands (150 °C) sind die größten Messabweichungen der Rohranlegethermometer von der Mediumstemperatur zu erwarten, wofür eine gleichsam stabile Mediumstemperatur notwendig ist. Daher liegt das Hauptaugenmerk der Parametrisierung auf einer stabilen Regelung im Bereich von 4,0 bar Sollüberdruck, entsprechend ca. 150 °C Mediumssolltemperatur.

Durch die in der Betriebsanleitung des Reglers (s. [108]) empfohlene Herangehensweise und experimentelle Bestimmung konnten die PID-Reglerparameter identifiziert werden (s. [114]: Verstärkungsfaktor $K_P = 48,5$, Nachstellzeit $T_N = 8$ s, Vorhaltzeit $T_V = 10$ s).

In den anschließenden Kapiteln wird auf die erzielbare Stabilität des Reglers bei verschiedenen Mediumssolltemperaturen sowie geöffneten Prüfstrecken näher eingegangen.

4.1.2 Kurzzeitstabilität

Aus der Zielstellung heraus, die Messabweichungen von Rohranlegethermometern bestimmen zu wollen, ist die Eignung der als Referenz für die Rohranlegethermometer dienenden Prüfstreckentemperatur bei sowohl verschiedenen Mediumstemperaturen als auch geöffneten Prüfstrecken nachzuweisen. Hierzu wurde die Solltemperatur in etwa 10 K-Schritten zwischen 100 °C und 150 °C variiert. Zusätzlich wurden 3 bauartgleiche Rohranlegethermometer an die zunächst einzig geöffnete DN ½"-Prüfstrecke 1 mit metallblanker Rohroberfläche angeklemmt. Abb. 4.1 stellt in vereinfachter Form die Lage der im folgenden betrachteten Thermometer im Prüfstand schematisch dar.

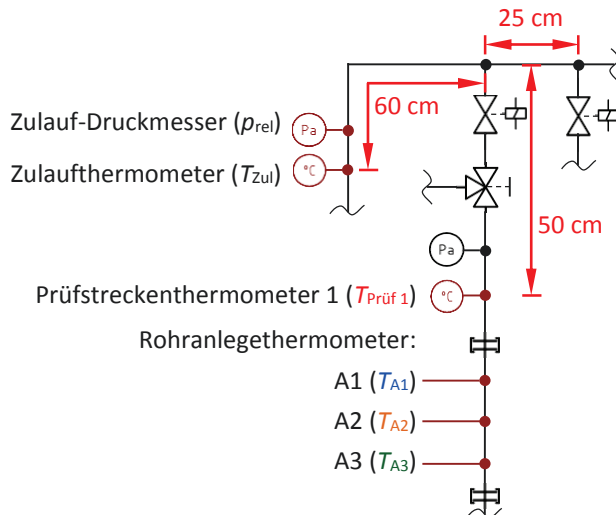


Abb. 4.1: Lage der Thermometer zur Messung der Kurzzeitstabilität

Wie aus Abb. 4.2 ersichtlich, weisen die Zulauf- (T_{Zul}) und Prüfstreckentemperatur ($T_{Prüf}$) sowohl einen nahezu identischen Verlauf als auch eine etwa gleiche Absoluttemperatur auf.

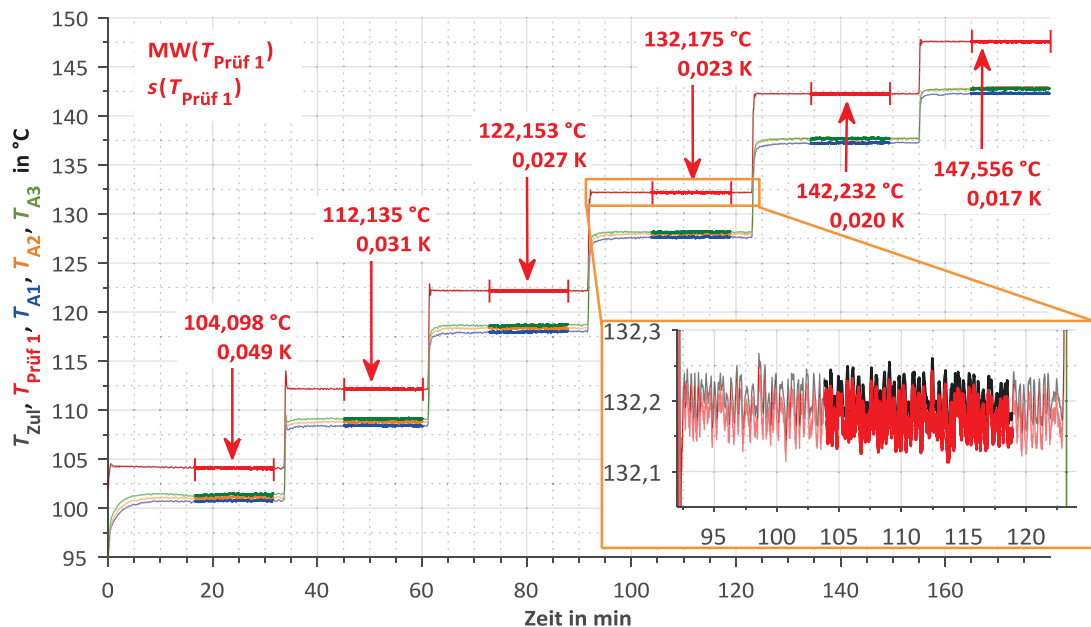


Abb. 4.2: Temperaturverlauf von Zulaufthermometer (T_{Zul}), Prüfstreckenthermometer ($T_{Prüf}$) und dreier identischer Rohranlegethermometer (T_{Ax}), metallblanke DN ½"-Prüfstrecke 1

Die Streuung der Prüfstreckentemperatur weist eine Standardabweichung von 49 mK bei ca. 100 °C auf, welche mit steigender Solltemperatur auf lediglich 17 mK bei ca. 150 °C sinkt. Diese Veränderung der Streuung ist auf die Druckregelung zurückzuführen, welche auf den höheren Temperaturbereich hin optimiert wurde. Im Vergleich zu dem in [92] beschriebenen Prüfstand, welcher ebenfalls mit Sattedampf arbeitet, konnte eine um Faktor 4 kleinere Standardabweichung erzielt werden (bei $T_{Soll} = 120$ °C).

Die Messabweichung zwischen den über ein Zeitintervall von 15 min bestimmten Mittelwerten der Prüfstrecken- und Zulauftemperatur ($T_{Prüf 1} - T_{Zul}$) beträgt -8 mK bei ca. 100 °C und steigt geringfügig auf -39 mK bei ca. 150 °C, siehe nachfolgende Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Messabweichungen der Prüfstrecken- von der Zulauftemperatur bei Prüfstrecke 1 und verschiedenen Solltemperaturen

	T_{Soll} in °C					
	100	110	120	130	140	150
$T_{\text{Prüf 1}} - T_{\text{Zul}}$ in K	-0,008	-0,016	-0,022	-0,027	-0,033	-0,039

Es kann daher geschlussfolgert werden, dass die Temperatur an beiden Messpositionen in der Prüfstandsverrohrung über den gesamten Einsatztemperaturbereich des Prüfstands als annähernd konstant angesehen werden kann.

Wiederholte Messreihen zeigen ein ähnliches Verhalten sowohl der Messabweichungen zwischen Prüfstrecken- und Zulauftemperatur als auch der Standardabweichungen des Prüfstreckenthermometers.

Da als weitere Anforderung an den Prüfstand auch der Betrieb mit mehreren gleichzeitig geöffneten Prüfstrecken möglich sein soll, wird zudem die Stabilität der jeweiligen Prüfstreckenthermometer sowie deren Messabweichung vom Zulaufthermometer näher untersucht. Da bei der oberen Einsatztemperatur des Prüfstands mit den größten Wärmeverlusten in der Verrohrung bzw. den Prüfstrecken zu rechnen ist, wird eine Solltemperatur von ca. 150 °C (4,0 bar Sollüberdruck) eingestellt. Anschließend erfolgt das gleichzeitige Öffnen von mehreren Prüfstreckenabgängen. Nach dem Einregeln des Sollüberdruckes und Erreichen eines stationären Temperaturverhaltens werden über einen Zeitraum von ca. 30 min die Mittelwerte der Messabweichungen zwischen den einzelnen Prüfstreckentemperaturen und der Zulauftemperatur ($T_{\text{Prüf } i} - T_{\text{Zul}}$) bestimmt.

Tab. 4.2 stellt die Messabweichungen bei verschiedenen geöffneten Prüfstrecken dar. Dabei zeigt sich, dass die jeweilig gemessenen Abweichungen der Prüfstreckentemperaturen auch mit steigender Anzahl von geöffneten Prüfstreckenabgängen keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die Messabweichungen in Abhängigkeit von der Anzahl der geöffneten Prüfstreckenabgänge liegen dabei innerhalb der Standardabweichungen der Prüfstreckenthermometer (siehe Tab. 4.3). Für alle aufgenommenen Messwerte der Thermometer kann eine vernachlässigbar kleine Drift $|\Delta T|/\Delta t$ von unter 5 mK/h bestimmt werden.

Tab. 4.2: Messabweichungen der Prüfstrecken- von der Zulauftemperatur bei verschiedenen geöffneten Prüfstrecken und 150 °C Solltemperatur

Geöffnete Prüfstrecken	T_{Zul} in °C	$T_{\text{Prüf } i} - T_{\text{Zul}}$ in K bei Prüfstrecke							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 – 3	151,465	-0,101	-0,008	-0,021	-	-	-	-	-
1 – 4	151,423	-0,082	-0,004	-0,017	0,292	-	-	-	-
1 – 5	151,463	-0,103	-0,009	-0,023	0,250	-0,033	-	-	-
5 – 8	151,469	-	-	-	-	-0,035	0,020	k. A.	-0,021

Zudem weisen die jeweiligen Prüfstreckenthermometer nur geringe Abweichungen von der Zulauftemperatur auf, selbst bei dem ca. 2,85 m Verrohrungslänge vom Zulaufthermometer entfernten Prüfstreckenthermometer 8. Dies spricht für geringe Wärmeverluste zwischen dem Medium Sattedampf und der Umgebung im Bereich der Verrohrung. Eine Ausnahme bildet lediglich das Prüfstreckenthermometer 4, welches mit 250 mK bzw. 292 mK eine scheinbar höhere Temperatur misst. Eine Ursache hierfür könnte evtl. in einer fehlerhaften Kalibrierung liegen. Da dieser Prüfstreckenabgang im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht genutzt wird, wurde an dieser Stelle auf eine weitergehende Untersuchung verzichtet.

Insgesamt betrachtet kann die gewünschte Mediumtemperatur im Bereich von 150 °C in bis zu 5 gleichzeitig betriebenen Prüfstrecken eingestellt werden. Zusätzlich ist dabei von stabilen Temperaturwerten unabhängig von der Anzahl der geöffneten Prüfstrecken auszugehen, wie die Standardabweichungen $s(T_{\text{Prüf } i})$ der einzelnen Prüfstreckenthermometer in Tab. 4.3 beweisen. Die max. Standardabweichung liegt bei 31 mK.

Tab. 4.3: Standardabweichungen der Prüfstrecken- und Zulauftemperatur bei verschiedenen geöffneten Prüfstrecken und 150 °C Solltemperatur

Geöffnete Prüfstrecken	$s(T_{\text{Zul}})$ in K	$s(T_{\text{Prüf } i})$ in K bei Prüfstrecke							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 – 3	0,026	0,027	0,030	0,031	-	-	-	-	-
1 – 4	0,021	0,022	0,025	0,025	0,025	-	-	-	-
1 – 5	0,019	0,020	0,022	0,022	0,022	0,022	-	-	-
5 – 8	0,020	-	-	-	-	0,022	0,022	k. A.	0,021

Die Druckregelung und damit indirekt auch die Regelung der Mediumtemperatur kann damit als stabil angesehen werden. Sind mehr als 5 Prüfstrecken bei 4,0 bar Sollüberdruck (ca. 150 °C Mediumssolltemperatur) geöffnet, so ist eine stabile Regelung nicht mehr möglich. Das Druckstellventil ist dann bereits vollständig geöffnet und durch die Druckverluste, vornehmlich in den Kondensatabscheidern, wird der Sollüberdruck praktisch nicht mehr erreicht. Ein stabiler Betrieb ist jedoch mit allen 8 geöffneten Prüfstrecken bis ca. 130 °C Mediumssolltemperatur möglich.

Zusammenfassend betrachtet, ist das Prüfstreckenthermometer für die Bestimmung der im Inneren des Prüfstreckenrohres vorherrschenden Mediumtemperatur geeignet und kann als Referenz zur Bestimmung dieser für die Rohranlegethermometer genutzt werden. Dies trifft selbst bei mehreren geöffneten Prüfstrecken zu.

4.1.3 Einfluss der Umgebungstemperatur und Langzeitstabilität

Um den Einfluss einer Änderung der Umgebungstemperatur auf die Messung der Mediumtemperatur näher ergründen zu können, wird ein konstanter relativer Solldruck p_{Soll} von 4 bar entsprechend einer Solltemperatur von ca. 150 °C eingestellt. Es erfolgt weiterhin eine Variation der Raumtemperatur im Bereich von 16,6 °C bis 29,1 °C. Am Prüfstand wird zudem die DN ½"-Prüfstrecke 1 durchströmt, so dass insbesondere die Beeinflussung auf das Prüfstreckenthermometer 1 im Folgenden näher betrachtet werden soll.

Abb. 4.3 oben zeigt die Änderung der Umgebungstemperatur ΔT_{Umg} bzw. des absoluten Zulaufdrucks Δp_{abs} (relativer Zulaufdruck p_{rel} + atmosphärischer Druck p_{atm} der Umgebung), wobei deren Messungsanfangswerte zu Null gesetzt werden. Hierbei zeigen sich geringfügige Druckschwankungen des absoluten Zulaufdrucks, welche jedoch vorrangig durch Änderungen des atmosphärischen Druckes p_{atm} der Umgebung hervorgerufen werden. Neben diesen äußeren Einflussgrößen stellt Abb. 4.3 die Änderung der Prüfstreckentemperatur $\Delta T_{\text{Prüf } 1}$ dar.

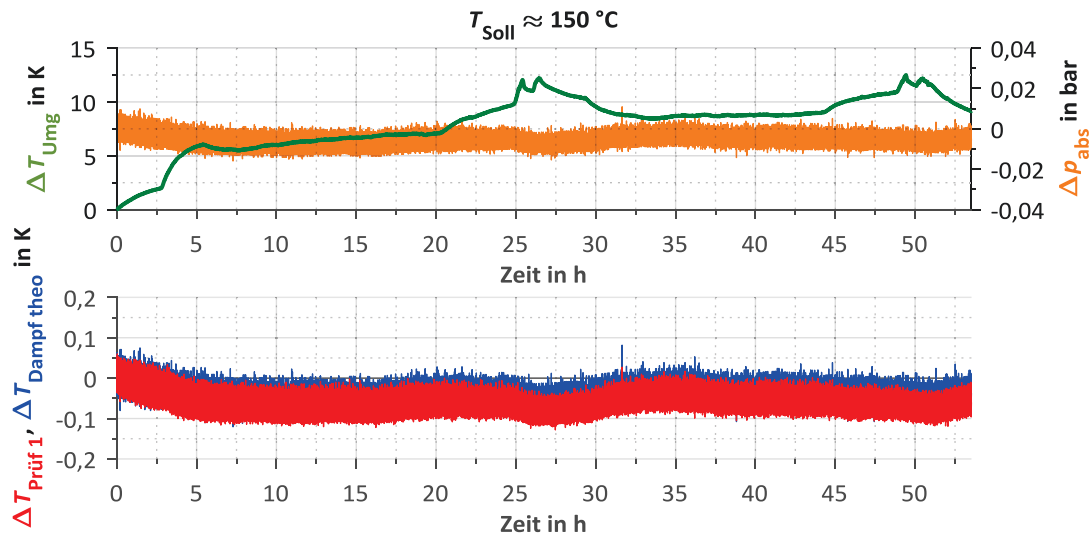


Abb. 4.3: Einfluss einer Änderung der Umgebungstemperatur ΔT_{Umg} bzw. des absoluten Zulaufdruckes Δp_{abs} auf eine Änderung der Prüfstreckentemperatur $\Delta T_{Prüf 1}$ sowie der theoretischen Dampftemperatur $\Delta T_{Dampf theo}$, metallblank DN ½"-Prüfstrecke 1, Anfangswerte zu Null gesetzt

Die Veränderungen im Verlauf der Prüfstreckentemperatur resultieren aus einer Änderung des absoluten Zulaufdruckes Δp_{abs} . Mittels des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Druck (s. Anhang A1.5 bzw. [95]) kann daraus die theoretisch berechnete Dampftemperaturänderung $\Delta T_{Dampf theo}$ ermittelt werden. Für die beiden Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Prüf 1}$ und $\Delta T_{Dampf theo}$ ergibt sich somit ein nahezu identischer Verlauf.

Durch Betrachtung der Differenz aus der Prüfstrecken- und Dampftemperatur ($\Delta T_{Prüf 1} - \Delta T_{Dampf theo}$) folgt mittels linearer Regression eine Drift von ca. -16 mK über den gesamten Messbereich bzw. -0,3 mK/h. Für die Differenz zwischen der Zulauf- und Dampftemperatur ($\Delta T_{Zul} - \Delta T_{Dampf theo}$) kann eine ähnlich niedrige Drift von ca. 0,6 mK/h ermittelt werden.

Es zeigt sich somit, dass es keinen signifikanten Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Mediumtemperatur sowie deren Messung gibt. Die Drift bewegt sich dabei im Bereich der Messunsicherheit der von den eingesetzten Messgeräten erfassten Größen. Zudem können weitere Störgrößen auf die Messung einwirken. Auf Grundlage dieser geringen Drift sind auch längerfristige Messungen von Rohranlegethermometern selbst über mehrere Tage unter dem Gesichtspunkt einer Langzeitstabilität der eingesetzten Referenzthermometer sowie Prüfstandsregelung realisierbar.

4.1.4 Störungen durch Luftströmungen im Raum

Ein schwierig zu erfassender Sachverhalt stellen mögliche Luftströmungen im Raum dar. Hierbei kann unterschieden werden zwischen der freien Konvektion des Prüfstandes selbst und möglicher Konvektionen im Raum durch z. B. andere Prüfstände mit thermischem Eintrag, betriebene Heizkörper, geöffnete Fenster und Türen sowie Bewegungen von Personen. Für die nachfolgenden Messungen wird daher darauf geachtet, dass während der Messreihen alle vorgenannten Störquellen auf ein Minimum reduziert werden. Die Anordnung der Prüfstrecken ist dabei so ausgelegt, dass sich insbesondere die freie Konvektion in deren unmittelbaren Umfeld möglichst ähnlich verhalten kann. Erste Messungen über einen Zeitraum von 2 h mit Hilfe eines, mittig zwischen 2 Prüfstrecken mit 150 °C Solltemperatur angebrachten, richtungsunabhängigen thermischen Hitzdraht-Anemometers ergaben, dass

Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 0,1 m/s zu erwarten sind. Für eine nähergehende Betrachtung des Einflusses durch erzwungene Konvektion sei auf die Messungen mit Rohranlegethermometern in Kap. 6.5 hingewiesen.

4.2 Prüfstreckenrohre

4.2.1 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit sowohl vom Sensor des Rohranlegethermometers als auch vom Rohr ist eine wichtige Einflussgröße des sich zwischen beiden ausprägenden thermischen Kontaktwiderstands (s. Kap. 2.2.7). Da die Oberflächenrauigkeit des Prüfstreckenrohrs unmittelbar die Messung mit Rohranlegethermometern beeinflussen kann und entsprechende Angaben des Herstellers der Prüfstreckenrohre nur einen groben Ansatzpunkt bieten, wird die außenseitige Rauigkeit für alle vorhandenen DN ½"-Prüfstreckenrohre gemessen. Hierzu erfolgen zunächst Messungen in axialer Rohrrichtung unter Anwendung der Normen DIN EN ISO 4287 [115] bzw. VDI/VDE 2602 [116]. Als Messstellen werden die gleichen für die Rohranlegethermometer verwendeten Messpositionen oben, mittig und unten mit jeweils 4 Drehwinkeln des Rohres verwendet. Üblicherweise erfolgt die Rauigkeitsangabe von Rohren als (arithmetischer) Mittenrauwert Ra , der auch an dieser Stelle Verwendung finden soll. Der Mittenrauwert Ra ist dabei als bestimmtes Integral der örtlichen Höhe $Z(x)$ dividiert durch die Länge der Messstrecke l_n definiert [115]:

$$Ra = \frac{1}{l_n} \cdot \int_0^{l_n} |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

Als Tastschnittgerät kommt ein Mitutoyo Surftest SJ-120 (vgl. [117]) zum Einsatz, welches neben der Profilaufnahme auch eine unmittelbare Ausgabe des Mittenrauwerths ermöglicht. In Analogie zur VDI/VDE 2602 [116] wurde durch erste Probemessungen eine notwendige Messstrecke l_n von 4 mm sowie ein Tastspitzenradius r von 2 µm für die Rauigkeitsmessungen gewählt. Tab. 4.4 stellt sowohl die Einzelmesswerte des Mittenrauwerthes Ra als auch dessen Mittelwert für die jeweilige Messposition dar.

Während sowohl das neue als auch das bereits benutzte metallblanken Prüfstreckenrohr über alle Messpositionen und Drehwinkel ähnliche Mittenrauwerte liefern, sind die Ergebnisse für das elektropolierte, glasperlengestrahlte und gebeizte Prüfstreckenrohr einer größeren Streuung je nach Messposition aber auch Drehwinkel unterworfen. Insbesondere beim gebeizten Prüfstreckenrohr zeigt sich eine starke Abhängigkeit zwischen Drehwinkel und Mittenrauwert, unabhängig von der Messposition. Dies lässt u. U. darauf schließen, dass das Rohr vor dem Beizen vergleichsweise einseitig gestrahlt wurde.

Tab. 4.4: Axialer Mittenrauwert R_a verschiedener DN ½"-Rohroberflächen

Messbereich		R_a der Oberfläche des DN ½"-Prüfstreckenrohres in μm				
Messposition in mm (gebeizt)	Drehwinkel in °	metallblank neu	metallblank benutzt	elektro-poliert	glasperlen-gestrahlt	gebeizt
oben: 100 (30)	0	0,246	0,310	0,513	1,711	1,439
	90	0,286	0,274	0,429	1,543	1,091
	180	0,268	0,218	0,415	1,473	1,267
	270	0,280	0,249	0,378	1,204	0,832
	Mittelwert	0,270	0,263	0,434	1,483	1,157
mittig: 350 (270)	0	0,302	0,400	0,204	1,667	1,455
	90	0,272	0,262	0,252	1,526	1,235
	180	0,320	0,254	0,276	1,546	1,521
	270	0,266	0,273	0,310	1,546	0,889
	Mittelwert	0,290	0,297	0,261	1,571	1,275
unten: 600 (510)	0	(0,638)	0,265	0,452	1,371	1,294
	90	0,283	0,267	0,450	1,303	1,479
	180	0,254	0,253	0,393	1,533	1,604
	270	0,228	0,261	0,415	1,284	1,069
	Mittelwert	0,255	0,262	0,428	1,373	1,362
Mittelwert		0,273	0,274	0,374	1,476	1,265
Standardabweichung		0,024	0,043	0,089	0,148	0,240
Herstellerangabe [118]		$\approx 1,6$	$\approx 1,6$	$< 0,38$	$> 3,0$	k. A.

Durch Bestimmung des Mittelwertes über alle Einzelmesswerte einer Rohroberfläche kann eine generelle Aussage über den zu erwartenden Mittenrauwert getroffen werden. Für die metallblanken sowie elektropolierten Rohroberflächen ergibt sich ein ähnlicher Mittenrauwert R_a von 0,27 μm bzw. 0,37 μm . Auffällig ist hierbei, dass das elektropolierte Prüfstreckenrohr einen höheren Mittenrauwert aufweist als das metallblankes Prüfstreckenrohr. Normalerweise ist durch das Elektropolieren ein geringerer Mittenrauwert zu erwarten. Evtl. wurde, entgegen der Herstellerangabe, das Rohr in einem Zwischenschritt zusätzlich geschliffen. Für die glasperlengestrahlte sowie gebeizte Rohroberfläche folgt ein deutlich höherer Mittenrauwert R_a von 1,48 μm bzw. 1,27 μm . Es können folglich 2 Gruppen von Prüfstreckenrohren aus Sichtweise ähnlicher äußerer Oberflächenrauigkeiten ausgemacht werden. Diese 2 Gruppen sind ebenfalls visuell gut erkennbar, wie Abb. A1 im Anhang vermittelt.

Im Vergleich der gemessenen Mittenrauwerte zu den gemachten Herstellerangaben treten erhebliche Abweichungen auf. Eine Ausnahme hiervon ergibt sich lediglich bei der elektropolierten Rohroberfläche. Die experimentelle Bestimmung der äußeren Oberflächenrauigkeit eines Prüfstreckenrohres vor Messungen mit Rohranlegethermometern ist somit stets sinnvoll.

Der radiale Mittenrauwert wird zudem in der mittleren Messposition mit 4 verschiedenen Drehwinkeln bestimmt. Hierbei kommt, aufgrund der Rohrkrümmung und dem eingeschränkten Hub der Tastspitze, eine verkürzte Messstrecke l_n von 3,2 mm zum Einsatz. Diese, geringfügig abweichend von der VDI/VDE 2602 [116] durchgeführten, Messungen liefern einen gemittelten radialen Mittenrauwert R_a von ca. 1,0 μm für die metallblanken und

elektropolierte Rohroberfläche sowie ca. $2,0\text{ }\mu\text{m}$ für die glasperlengestrahlte und ca. $2,2\text{ }\mu\text{m}$ für die gebeizte Rohroberfläche. Zusammenfassend ergibt sich die gleiche Eingruppierung nach der äußeren Oberflächenrauigkeit wie in axialer Rohrrichtung.

4.2.2 Mediumstemperatur entlang der Rohrachse

Durch die Verwendung des Prüfstrecken-Thermometers ist zunächst die Mediumtemperatur $T_{\text{Prüf}}$ am Eintritt des Sattedampfes in das Prüfstreckenrohr bekannt. Durch die Wärmetransportvorgänge vom Medium durch die Rohrwand hin zur Umgebung kann es entlang der Rohrlängsachse zu einem Gradienten der Mediumtemperatur kommen, so dass dies nähergehend untersucht werden muss. Hierbei kommt das durchschiebbare Thermometer (s. Kap. 3.4.7) im abgewinkelten gebeizten Prüfstreckenrohr zum Einsatz. Mittels Verschiebung dieses Thermometers von oben nach unten durch das 538 mm lange Prüfstreckenrohr bei sowohl $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ als auch $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellter Solltemperatur kann die Messabweichung aus dem Mittelwert zwischen der Temperatur T_{DST} des durchschiebbaren Thermometers abzüglich der Prüfstrecken- ($T_{\text{Prüf } 2}$) bzw. Zulauf- (T_{Zul}) örtlich aufgelöst werden. Die Messdauer zur Mittelwertbildung beträgt dabei min. 30 min pro Messposition.

Abb. 4.4 stellt die Ergebnisse anschaulich dar. Die Koordinate y gibt dabei die Lage der Spitze des durchschiebbaren Thermometers (DST) im gebeizten Prüfstreckenrohr an. Da der Temperatursensor des DST eine Gesamtlänge von ca. 10 mm aufweist, stellen die in der Abb. 4.4 fett markierten y -Positionen die später verwendeten Messpositionen der Rohranlegethermometer an dem gebeizten Prüfstreckenrohr dar.

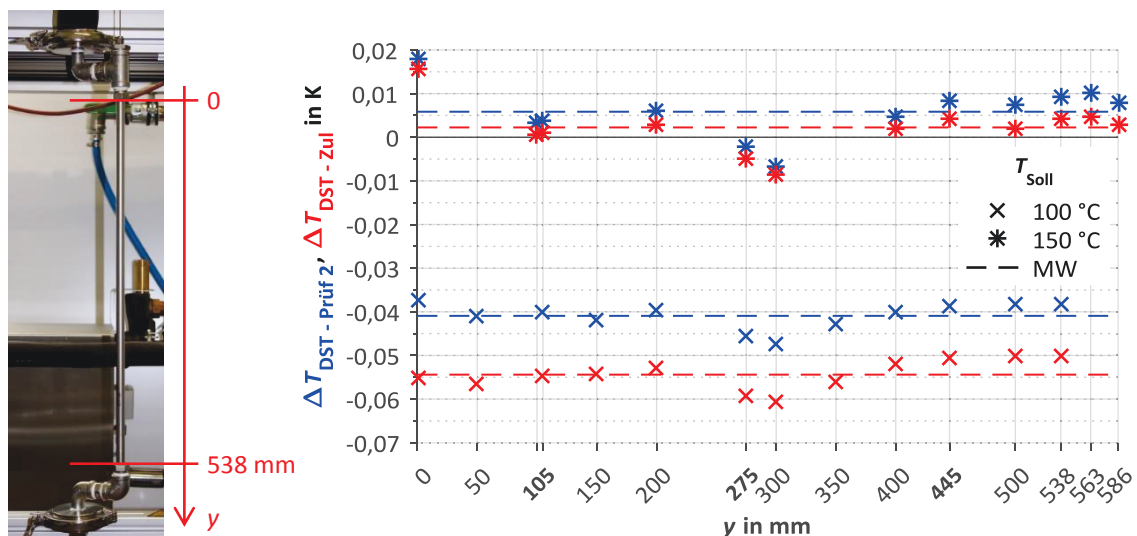


Abb. 4.4: Messabweichung der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers von der Prüfstrecken- (blau) sowie Zulauf- (rot) Temperatur in Abhängigkeit von der Position im gebeizten DN $\frac{1}{2}$ "-Prüfstreckenrohr und der Solltemperatur

Bei einer Solltemperatur T_{Soll} von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann kein Temperaturgradient der Mediumtemperatur entlang der Rohrachse ausgemacht werden. Die Messabweichungen zwischen der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers und der Zulauf- bzw. Prüfstrecken-temperatur bewegen sich im Bereich der Messunsicherheit, so dass keine signifikanten Abweichungen der Mediumtemperatur zwischen den örtlich teilweise weit auseinanderliegenden Temperaturmessstellen erkennbar sind.

Für eine Solltemperatur T_{Soll} von 100 °C kann ebenso kein Temperaturgradient entlang der Rohrachse ausgemacht werden. Jedoch zeigt sich eine über alle y -Positionen nahezu konstante Messabweichung $\Delta T_{\text{DST} - \text{Prüf2}}$ von ca. -41 mK. Mögliche Ursachen hierfür sind evtl. in Kennlinienfehlern zwischen den Thermometern zu finden.

Aus zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen mit an den Messpositionen adaptierten Rohranlegethermometern sowie unterschiedlichen Solltemperaturen (s. Tab. A1) ergeben sich nahezu identische Messabweichungen über alle Messpositionen. Die Abhängigkeit $\Delta T_{\text{DST} - \text{Prüf2}}$ bzw. $\Delta T_{\text{DST} - \text{Zul}}$ von T_{Soll} kann näherungsweise als linear zwischen den beiden in Abb. 4.4 betrachteten Solltemperaturen angesehen werden. Dies stärkt zudem den Verdacht von Kennlinienfehlern des Zulauf- und/oder durchschiebbaren Thermometers, bewegt sich jedoch noch im Rahmen der Messunsicherheit beider Thermometer (vgl. Kap. 5.2.3).

Sowohl durch die Befestigung von Rohranlegethermometern an das Prüfstreckenrohr als auch durch erzwungene Konvektion mit max. Lüfterleistung kann keine Änderung auf die Temperatur T_{DST} (bzw. $\Delta T_{\text{DST} - \text{Prüf2}}$) des, sich in dem jeweiligen Einflussbereich befindlichen, DST gemessen werden. Äußere Einflüsse durch Befestigung der hier untersuchten Rohranlegethermometer und erzwungene Konvektion durch den Lüfter des Prüfstandes sind somit als thermisch rückwirkungsfrei auf die Messung der Mediumtemperatur zu betrachten.

Eine vergleichende Messung von Rohranlegethermometern an unterschiedlichen Messpositionen ist aus Sichtweise einer an allen Positionen konstanten Mediumtemperatur auf der Rohrlängsachse in jedem Fall gegeben. Aufgrund ähnlicher Geometrie ist davon auszugehen, dass die gewonnenen Ergebnisse auch auf die anderen DN ½"-Prüfstreckenrohre übertragen werden können.

4.2.3 Umgebungstemperatur im direkten Rohrumfeld

Wie bereits einleitend erwähnt, spielt die Umgebungstemperatur T_{Umg} eine tragende Rolle für die Wärmetransportvorgänge zwischen Rohraußenwand bzw. Rohranlegethermometer und Umgebung. Die Umgebungstemperatur darf sich somit an den verschiedenen Messpositionen der Rohranlegethermometer am Prüfstreckenrohr nicht wesentlich unterscheiden, um eine Vergleichbarkeit unter möglichst gleichen Bedingungen zu gewährleisten. Um die Änderungen der Umgebungstemperatur in axialer (y) und radialer (x) Richtung um das Prüfstreckenrohr zu ergründen wird mit Hilfe einer Linearführung ein kalibriertes Pt1000-Thermometer (UR) so verfahren, dass sich dessen Temperatursensor stets senkrecht mittig zu einem theoretischen Längsschnitt des Prüfstreckenrohres befindet. Abb. 4.5 stellt den genutzten Versuchsaufbau zur Messung am metallblanken Prüfstreckenrohr dar. Hierbei wird die Prüfstrecke mit einer Solltemperatur von ca. 150 °C betrieben.

Da sich die Umgebungstemperatur insgesamt während der Messungen verändern könnte, wird die Differenz ΔT_{Umg} zwischen dem an der Linearführung angebrachten Thermometer (mit T_{UR}) und dem von Wärmequellen vergleichsweise unbeeinflussten eigentlichen Umgebungsthermometer des Prüfstandes (mit T_{Umg}) bestimmt.

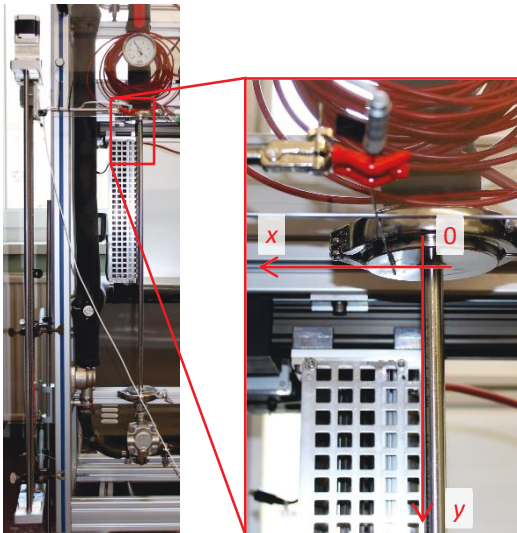


Abb. 4.5: Messaufbau zur Bestimmung der Umgebungstemperatur um die metallblanken Prüfstrecke 1 mittels Thermometer UR

Durch Abrasterung mit 10 mm Schritten in x- sowie 50 mm Schritten in y-Richtung und Interpolation von Zwischenwerten ergibt sich das in Abb. 4.6 dargelegte Temperaturfeld. Pro Messpunkt werden die jeweiligen Temperatur-Mittelwerte über ca. 1 h verwendet.

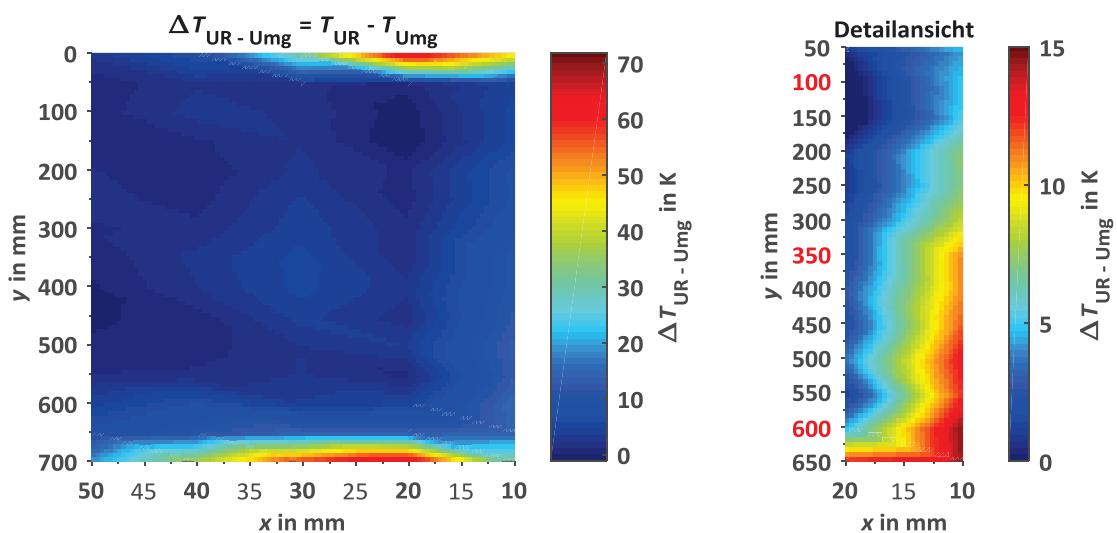


Abb. 4.6: Feld der Temperaturdifferenz zwischen unbeeinflusster und direkt in Rohrnähe gemessener Umgebungstemperatur im Umfeld der metallblanken DN ½"-Prüfstrecke 1

Die in Abb. 4.6 links oben und unten gut erkennbaren Felder mit großer Umgebungstemperaturdifferenz ΔT_{Umg} sind die Bereiche, in denen sich die Flansche des Prüfstreckenrohres befinden. Sie liegen ausreichend weit entfernt von den später verwendeten 3 Messpositionen der Rohranlegethermometer ($y = 100 \text{ mm}$, 350 mm und 600 mm). Gut sichtbar ist ebenfalls der z. T. große Gradient von ΔT_{Umg} in x-Richtung, selbst bei vergleichsweise großem Abstand zum Rohr. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Standardabweichung $s(\Delta T_{UR})$ des Thermometers UR im Bereich von ca. 0,3 K bis ca. 3,6 K je nach Messpunkt bewegt (s. Abb. A2).

Bei detaillierterer Betrachtung (s. Abb. 4.6 rechts) zeigt sich, dass es zur Ausbildung von Isothermen im unmittelbaren Rohrumfeld kommt, welche jedoch nicht parallel zur Rohraußenwand ausgerichtet sind. Mögliche Ursachen hierfür sind sowohl in einer möglichen leichten Schiefstellung der Linearführung als auch dem thermischen Einfluss des

unteren Flansches zu finden. Weiterhin lässt sich ein annähernd exponentieller Abfall der Umgebungstemperatur mit zunehmenden (x -) Abstand zum Rohr erkennen, welcher sich auch in der Theorie ergibt (s. Abb. 2.3).

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass die örtliche Umgebungstemperatur bei gleichem radialen Abstand zum Rohr, Gradienten in axialer (y -) Richtung unterworfen ist. Für zukünftige Messungen mit Rohranlegethermometern ist somit u. U. mit steigenden direkten Umgebungstemperaturen von der oberen hin zur unteren Messposition zu rechnen.

4.2.4 Erzielbare Strömungsgeschwindigkeiten des Lüfters

Aus einem Projektseminar [114] sind Untersuchungen zu den erzielbaren Strömungsgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Lüfterleistungen bekannt. Dabei wurde zwischen dem Prüfstreckenrohr 3 und 4 ein thermisches Anemometer so platziert, dass sich dessen Anordnung parallel zur Strömungsaustrittsfläche des Lüfters und in etwa gleichen Abstand wie die Rohrachse zum Lüfter befand. In Abb. 4.7 ist der verwendete Messaufbau sowie das sich (auf vorgenannten Daten basierende) ergebende Strömungsfeld exemplarisch für 100 % Lüfterleistung dargestellt.

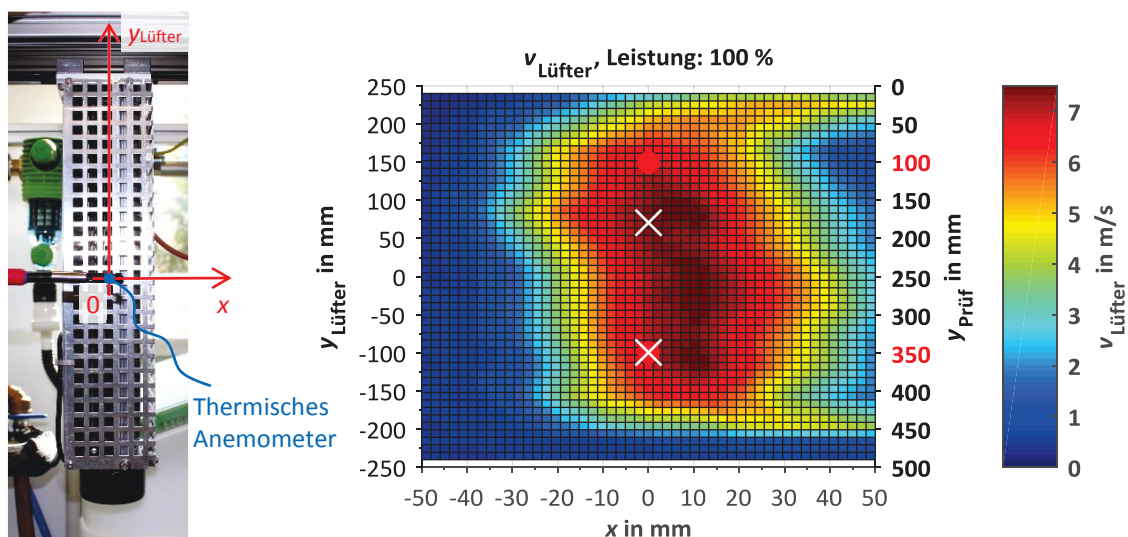


Abb. 4.7: Messaufbau [114] und Strömungsfeld (Daten aus [114]) der ungestörten Lüfterströmung in der Ebene der Prüfstrecken mit den Messpositionen der Rohranlegethermometer für die geheizte (weiß) sowie alle anderen Prüfstrecken (rot, $y_{\text{Prüf}}$), Lüfterleistung: 100 %

Gut erkennbar sind die z. T. großen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ des Lüfters. Es ergibt sich somit ein eher turbulentes Strömungsprofil. Unter Zuhilfenahme der, bereits in den vorherigen Kapiteln verwendeten, Koordinate des Prüfstreckenrohres $y_{\text{Prüf}}$ kann die Strömungsgeschwindigkeit ansatzweise an der später verwendeten oberen sowie mittigen Messposition der Rohranlegethermometer ($y_{\text{Prüf}} = 100 \text{ mm}$, 350 mm) bestimmt werden. In Analogie dazu erfolgt auch die Bestimmung an der oberen und mittigen Messposition der geheizten Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer ($y_{\text{DST}} = 100 \text{ mm}$, 270 mm). Durch die in Abb. A3 dargelegten Messungen bei weiteren Lüfterleistungen sowie zusätzliche Messungen auf Höhe der unteren Messpositionen sind die zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten an den Messpositionen bei verschiedenen Lüfterleistungen der Tab. 4.5 entnehmbar.

Tab. 4.5: Strömungsgeschwindigkeit an den Messpositionen bei verschiedenen Lüfterleistungen

Metallblanke, glasperlengestahlte und elektropolierte Prüfstrecken (Prüfstrecke 1 – 8)					
Messposition y_{Prüf} in mm	Messposition y_{Lüfter} in mm	Strömungsgeschwindigkeit v_{Lüfter} in m/s bei Lüfterleistung:			
		20 %	50 %	65 %	100 %
oben: 100	150	2,4	4,6	5,2	6,6
mittig: 350	-100	2,5	5,3	5,5	7,0
unten: 600	(-350)	-	-	-	-
Gebeizte Prüfstrecke (mit durchschiebbarem Thermometer)					
Messposition y_{DST} in mm	Messposition y_{Lüfter} in mm	Strömungsgeschwindigkeit v_{Lüfter} in m/s bei Lüfterleistung:			
		20 %	50 %	65 %	100 %
oben: 100	70	2,6	5,0	5,7	7,3
mittig: 270	-100	2,5	5,3	5,5	7,0
unten: 440	(-270)	0,3	0,4	0,4	0,5

Die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind je nach Messposition sehr unterschiedlich und mit großen Streuungen der Messwerte behaftet. Da die unteren Messpositionen weit von dem eigentlichen Strömungsbereich des Lüfters entfernt sind, können Messungen mit erzwungener Konvektion an dieser Stelle nur bedingt vorgenommen werden.

Abschließend ist anzumerken, dass durch den Einsatz sowohl eines Prüfstreckenrohres als auch daran befestigter Rohranlegethermometer das Strömungsprofil und die -geschwindigkeiten deutlich beeinflusst werden können, wobei eine kleinere Strömungsgeschwindigkeit an den Messpositionen zu erwarten ist. Dennoch stellen die dargelegten Messergebnisse eine gute Basis für eine ungefähre Abschätzung der maximal zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten an den Messpositionen durch erzwungene Konvektion des Lüfters dar. Der Einfluss durch erzwungene Konvektion auf die späteren Messungen von Rohranlegethermometern kann mit Hilfe des Lüfter prinzipiell gut nachgebildet werden.

5. Messunsicherheitsbetrachtungen

Neben den durchgeführten Messungen zur Verifizierung des Prüfstandes soll in diesem Kapitel die Messunsicherheit der als Referenz fungierenden Sattedampftemperatur betrachtet werden. Hierzu werden alle wesentlichen Messunsicherheiten der Komponenten innerhalb der Messkette dargelegt und zur Gesamtmessunsicherheit zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine Bewertung zur Eignung des Prüfstandes für die späteren Messungen mit Rohranlegethermometern.

5.1 Überblick

Zur Bestimmung und Angabe der Messunsicherheiten wurde sich am Verfahren nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [119] sowie [120-124] orientiert. In der allgemeinen Betrachtung wird hierbei der Zusammenhang zwischen dem Messergebnis y und verschiedenen Einflussgrößen x_i mit Hilfe einer Modellgleichung $y = f(x_1, \dots, x_n)$ dargestellt. Für jede Einflussgröße x_i muss zunächst deren Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ bestimmt werden. Dabei kann, entsprechend des GUM [119], zwischen statistischen (Typ A) und nicht statistischen (Typ B) Standardmessunsicherheiten unterschieden werden.

Die Abschätzung für die statistische Standardmessunsicherheit bei einer Normalverteilung der Messwerte folgt aus der Standardabweichung $s(\bar{q})$ des arithmetischen Mittelwertes \bar{q} mit n Messwerten q_i :

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (5.1)$$

Für die nicht statistische Standardmessunsicherheit bei einer symmetrischen Gleichverteilung (Rechteckverteilung) der Messwerte in den Grenzen von $\pm a$ folgt:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

Liegt eine asymmetrische Rechteckverteilung der Messwerte mit der oberen Grenze a_+ und der unteren Grenze a_- ($a_+ \neq a_-$) vor, so gilt für die nicht statistische Standardmessunsicherheit [124, S. 20]:

$$u = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad (5.3)$$

Die Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit des Messergebnisses $u_c(y)$ erfolgt bei unkorrelierten Einflussgrößen aus den mit der Empfindlichkeit c_i gewichteten Standardmessunsicherheiten $u(x_i)$ der Einflussgrößen x_i :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (5.4)$$

Die erweiterte Messunsicherheit des Messergebnisses $U(y)$ kann durch Multiplikation der kombinierten Messunsicherheit $u_c(y)$ mit dem Erweiterungsfaktor k ermittelt werden. Bei technischen Anwendungen ist hierbei ein Erweiterungsfaktor $k = 2$ üblich, welcher in dieser Arbeit ebenfalls Anwendung finden soll. Daraus ergibt sich ein Vertrauensbereich von etwa 95 %.

Um die mittels Rohranlegethermometern aufgenommenen Messwerte bzw. ihre Messabweichungen von der Mediumtemperatur bewerten zu können, ist es ebenso erforderlich die mit Hilfe des Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometers bestimmte Mediumtemperatur (Sattdampftherperatur) ausreichend genau zu kennen. Ein Maß hierfür stellt die kombinierte Messunsicherheit der in Abb. 5.1 gezeigten Messkette eines verwendeten Prüfstreckenthermometers dar. Die folgenden Betrachtungen gelten für das Zulaufthermometer in gleicher Weise.

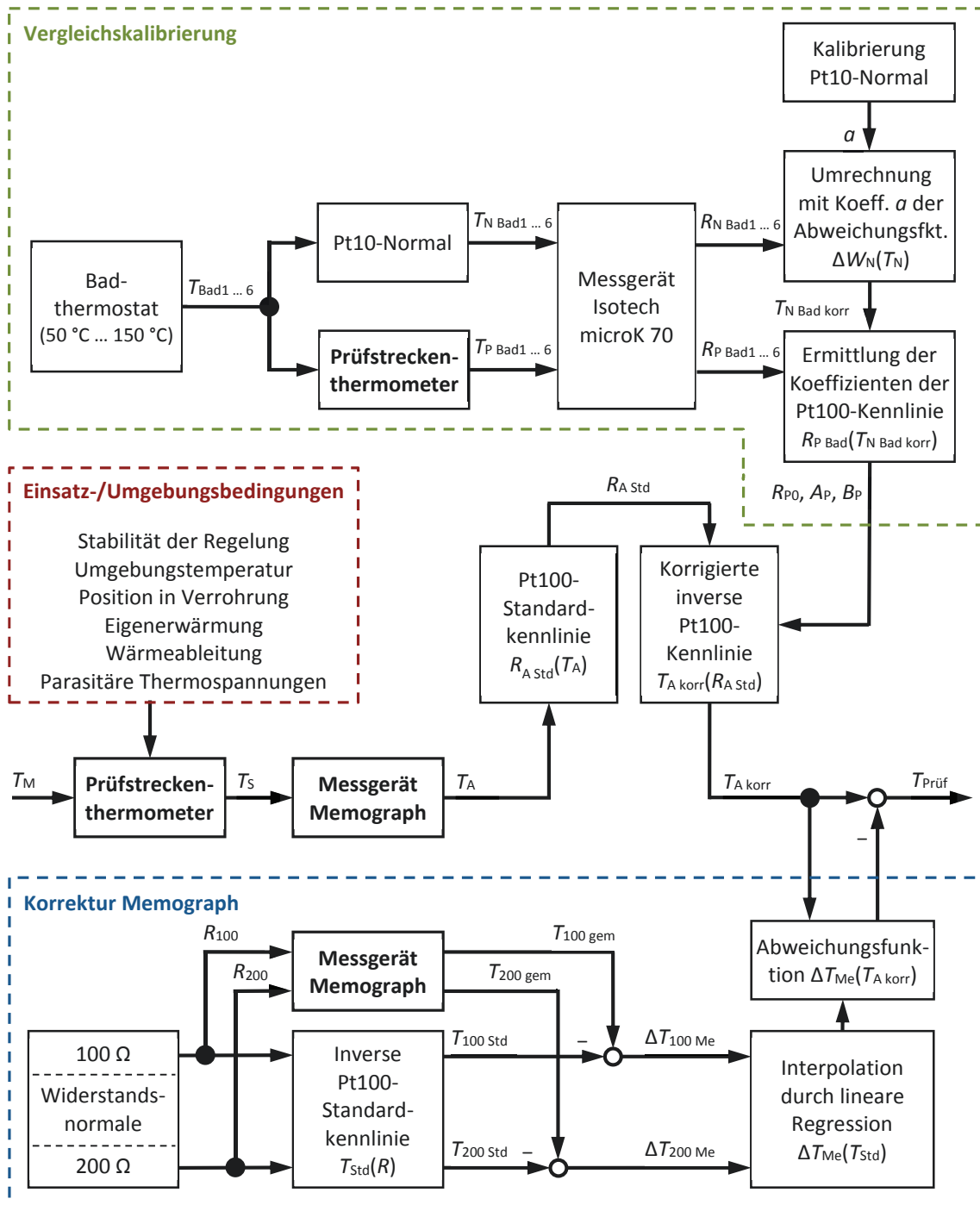


Abb. 5.1: Schematische Messkette zur Bestimmung der Messunsicherheit der gemessenen und korrigierten Mediumtemperatur $T_{\text{Prüf}}$ mittels eines Prüfstreckenthermometers

Ausgehend von der im Bereich der späteren Messposition des Rohranlegethermometers vorliegenden Mediumstemperatur T_M auf der Rohrachse sei zunächst das Prüfstreckenthermometer mit seiner Sensortemperatur T_S betrachtet. Einflussgrößen (δT_U) auf die beiden Temperaturen können als Einsatz- und Umgebungsbedingungen zusammengefasst werden. Weitergehend erfolgt eine Erfassung der Sensortemperatur T_S des Prüfstreckenthermometers durch das eingesetzte Messgerät Memograph, dessen Anzeigewert T_A (mit den Einflussgrößen δT_A) wiederum durch eine Vergleichskalibrierung des Prüfstreckenthermometers korrigiert wird (ΔT_V) und den korrigierten Anzeigewert $T_{A \text{ kor}}$ liefert. Durch die nachfolgende Korrektur (ΔT_{Me}) des Memographs wird der korrigierte Wert $T_{Prüf}$ der gemessenen Mediumstemperatur bestimmt.

Es kann daher folgende allgemeine Modellgleichung zur Bestimmung der Messunsicherheit der gemessenen und korrigierten Mediumstemperatur $T_{Prüf}$ aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} T_{Prüf} &= T_S + \delta T_A - \Delta T_V - \Delta T_{Me} \\ T_{Prüf} &= T_M + \delta T_U + \delta T_A - T_A + T_{A \text{ kor}} - \Delta T_{Me} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Detailliertere Erläuterungen zur Vorgehensweise der Korrekturen bzw. Bestimmung der Messunsicherheiten durch die Einsatz- und Umgebungsbedingungen, den Anzeigewert der Memographen, die Korrektur durch Vergleichskalibrierungen sowie die Korrektur der Memographen werden in kommenden gleichnamigen Kapiteln vorgenommen. Die dabei angewandten Kalibrierungen erfolgten in einem nicht akkreditierten Labor, beruhen jedoch auf rückführbar kalibrierten Normalen.

Im Fokus der Betrachtungen steht die Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit über den gesamten Einsatztemperaturbereich von 100 °C bis 150 °C des Prüfstandes. Aufgrund dessen und der späteren Verwendung von, je nach benutztem Prüfstreckenabgang, unterschiedlichen Prüfstreckenthermometern wird sich bei der Bestimmung der Standardmessunsicherheit einer Einflussgröße an der jeweilig größtmöglichen Standardmessunsicherheit mehrerer Thermometer, Messkanäle etc. orientiert. Durch geeignete Betrachtungen und Annahmen soll zudem die kombinierte Messunsicherheit möglichst allgemeingültig für eine beliebige Messung über den Zeitraum der nachfolgend betrachteten Messreihen mit Rohranlegethermometern sein. Die hier betrachtete kombinierte Messunsicherheit stellt somit eine Abschätzung im ungünstigsten Fall dar.

5.2 Einzelkomponenten

5.2.1 Einsatz- und Umgebungsbedingungen

Aus den direkten Einsatz- und Umgebungsbedingungen der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer im Prüfstand kann die vereinfachte Modellgleichung

$$\begin{aligned} T_S &= T_M + \delta T_U \\ T_S &= T_M + \delta T_{U \text{ Stab}} + \delta T_{U \text{ U}} + \delta T_{U \text{ Lage}} + \delta T_{U \text{ Ew}} + \delta T_{U \text{ Wa}} + \delta T_{U \text{ par}} \end{aligned} \quad (5.6)$$

aufgestellt und folgende Abweichungen und Messunsicherheiten für die Sensortemperatur T_S ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass der beste Schätzwert für die Abweichungen i. A. nicht bekannt ist und daher zu Null angenommen wird. Die einzelnen Abweichungen sind jedoch unsicherheitsbehaftet.

$\delta T_{U \text{ Stab}}$	<p><i>Abweichung durch mittels Zulauf- und Prüfstreckenthermometer im Prüfstand gemessene Kurzzeitstabilität über einen Zeitraum von ca. 30 min</i></p> <p>Dies beinhaltet insbesondere die Stabilität der Regelung. Ermittlung aus einer Vielzahl von Einzelmessungen des jeweilig eingesetzten Prüfstrecken- sowie Zulaufthermometers über den Gesamtzeitraum der Untersuchungen. Bei Betrachtung der Solltemperaturen 100 °C sowie 150 °C kann zu jedem einzelnen Thermometer der Mittelwert der Standardabweichungen aller Einzelmessreihen bestimmt werden. In der Gesamtbetrachtung aller Zulauf- und Prüfstreckenthermometer folgt dann eine maximale Standardabweichung von 55 mK.</p>
$\delta T_{U \text{ U}}$	<p><i>Abweichung durch den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Zulauf- und Prüfstreckenthermometer</i></p> <p>Bestimmung anhand mehrerer Messreihen mit Umgebungstemperaturänderung im Bereich von ± 5 K. Die Änderung der Zulauf- bzw. Prüfstreckentemperatur beträgt maximal 31,5 mK (vgl. Kap. 4.1.3). Mittels symmetrischer Rechteckverteilung kann eine Standardmessunsicherheit von $(31,5 \text{ mK} / 2) / \sqrt{3}$ abgeschätzt werden.</p>
$\delta T_{U \text{ Lage}}$	<p><i>Abweichung der Temperatur der Prüfstreckenthermometer von der Mediumtemperatur im Anklemmbereich der zu untersuchenden Rohranlegethermometer</i></p> <p>Messungen mittels DN ½"-Prüfstreckenrohr sowie dem durchschiebbaren Thermometer (DST) zeigen keine eindeutige Abhängigkeit der Mediumtemperatur entlang der Rohrachse (s. Kap. 4.2.2). Dennoch Verwendung der max. positionsabhängigen Temperaturdifferenz von 24,6 mK zwischen Prüfstreckenthermometer und DST bei 150 °C. Mit Hilfe einer symmetrischen Rechteckverteilung folgt eine Standardmessunsicherheit von $(24,6 \text{ mK} / 2) / \sqrt{3}$.</p>
$\delta T_{U \text{ Ew}}$	<p><i>Abweichung durch Eigenerwärmung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer bei Verwendung in der Verrohrung des Prüfstandes</i></p> <p>Messungen mittels eines externen Messgerätes mit 2 Messströmen und 3 Prüfstreckenthermometern bei 150 °C liefern eine max. Eigenerwärmung von 11,2 mK für den auch bei den Memographen verwendeten Messstrom von ca. 1 mA. Durch asymmetrische Rechteckverteilung kann die Standardmessunsicherheit zu $11,2 \text{ mK} / \sqrt{12}$ ermittelt werden.</p>
$\delta T_{U \text{ Wa}}$	<p><i>Abweichung durch Wärmeableitung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer bei Verwendung im Prüfstand</i></p> <p>Aufgrund des geringen Durchmessers der Thermometer bei großer Schutzrohrlänge im Medium und die äußere Rohrisolierung kann der Einfluss vernachlässigt werden.</p>
$\delta T_{U \text{ par}}$	<p><i>Abweichung durch parasitäre Thermospannungen der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer</i></p> <p>Messungen durch Umpolung direkt an den Messkanälen des Memographen bei 150 °C Mediumtemperatur und 4 Prüfstreckenthermometern zeigen nur geringfügige Unterschiede. Die maximal auftretende Grenzwertabweichung liegt bei $\pm 11,5 \text{ mK}$. Daraus resultiert eine Standardmessunsicherheit von $11,5 \text{ mK} / \sqrt{3}$.</p>

Die Zusammenfassung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge kann der Tab. 5.1 entnommen werden.

Tab. 5.1: Messunsicherheitsbudget für die Sensortemperatur T_S der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer unter Einsatz- und Umgebungsbedingungen

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivität	Messunsicherheitsbeitrag	Anteil ¹⁾
$\delta T_{U \text{ Stab}}$	0 K	55,0 mK	Normal	1	55,0 mK	94,2 %
$\delta T_{U \text{ U}}$	0 K	9,1 mK	Rechteck	1	9,1 mK	2,6 %
$\delta T_{U \text{ Lage}}$	0 K	7,1 mK	Rechteck	1	7,1 mK	1,6 %
$\delta T_{U \text{ Ew}}$	0 K	3,2 mK	Rechteck	1	3,2 mK	0,3 %
$\delta T_{U \text{ Wa}}$	0 K	0,0 mK	Rechteck	1	0,0 mK	0,0 %
$\delta T_{U \text{ par}}$	0 K	6,6 mK	Rechteck	1	6,6 mK	1,4 %
Kombinierte Messunsicherheit					56,7 mK	100 %
Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$)					114 mK	

¹⁾ Bestimmung mit quadratischen Unsicherheiten

Durch die Einsatz- und Umgebungsbedingungen im Anwendungsfall der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer kann eine kombinierte Messunsicherheit von 57 mK für die Sensortemperatur T_S ermittelt werden. Mittels des Erweiterungsfaktors $k = 2$ folgt eine erweiterte Messunsicherheit von 114 mK. Als deutlichster Unsicherheitsbeitrag tritt dabei der Einfluss durch die Kurzzeitstabilität ($\delta T_{U \text{ Stab}}$) in Erscheinung. Dieser ließe sich evtl. durch weitere Optimierungen des Druckreglers oder eine Regelung auf den Absolutdruck bzw. direkt auf die Solltemperatur minimieren.

5.2.2 Anzeigewert der Memographen

Die Memographen sind die zentralen Messgeräte zur Erfassung der Sensortemperatur T_S der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer, aber auch der Rohranlegethermometer. Für den Anzeigewert T_A der Memographen können mittels Gleichung

$$\begin{aligned} T_A &= T_S + \delta T_A \\ T_A &= T_S + \delta T_{A \text{ Auf}} + \delta T_{A \text{ gem}} + \delta T_{A \text{ U}} + \delta T_{A \text{ Drift}} \end{aligned} \quad (5.7)$$

folgende Abweichungen und Messunsicherheiten betrachtet werden. Wie im vorgehenden Kapitel, wird hier ebenfalls der beste Schätzwert zu Null gesetzt.

$\delta T_{A \text{ Auf}}$	<p><i>Abweichung durch Anzeigewert der Memographen</i></p> <p>Die Auflösung der Anzeige der Memographen beträgt 1 mK [110]. Daraus folgt eine vernachlässigbare Standardmessunsicherheit von $(1 \text{ mK} / 2) / \sqrt{3}$.</p>
$\delta T_{A \text{ gem}}$	<p><i>Abweichung durch Streuung der Messwerte bei der Kalibrierung mit den Widerstandsnormalen (s. Kap. 5.2.4)</i></p> <p>Die Standardabweichung der jeweiligen Mittelwerte aller Messkanäle ist sehr ähnlich und beträgt maximal 5 mK.</p>
$\delta T_{A \text{ U}}$	<p><i>Abweichung durch den Einfluss der Umgebungstemperatur</i></p> <p>Ermittlung der Abweichung anhand von Messungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und einem 200 Ω-Widerstandsnormal an allen Messkanälen. Für eine Erhöhung der Umgebungstemperatur um 5,3 K folgt ein um max. 30 mK höherer Anzeigewert der Memographen. Für eine Änderung der</p>

Umgebungstemperatur um ± 5 K kann somit eine Standardmessunsicherheit von 30 mK / $\sqrt{3}$ abgeschätzt werden.

$\delta T_{A \text{ Drift}}$ *Abweichung durch eine mögliche zeitliche Drift der Messkanäle*
 Umfangreiche Langzeituntersuchungen mit einer bauartgleichen Messelektronik sowie 100 Ω - und 200 Ω -Widerstandsnormale weisen eine maximale mittlere Drift von -3,2 mK pro Jahr auf. Für 2 Jahre sowie eine asymmetrische Rechteckverteilung folgt für die Standardmessunsicherheit 6,4 mK / $\sqrt{12}$.

Eine zusammenfassende Darstellung der vorhergehenden Unsicherheitsbeiträge der Abweichungen findet sich in Tab. 5.2.

Tab. 5.2: Messunsicherheitsbudget für den Anzeigewert T_A der Memographen

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivität	Messunsicherheitsbeitrag	Anteil ¹⁾
$\delta T_{A \text{ Auf}}$	0 K	0,3 mK	Rechteck	1	0,3 mK	< 0,1 %
$\delta T_{A \text{ gem}}$	0 K	5,0 mK	Normal	1	5,0 mK	7,6 %
$\delta T_{A \text{ U}}$	0 K	17,3 mK	Rechteck	1	17,3 mK	91,3 %
$\delta T_{A \text{ Drift}}$	0 K	1,9 mK	Rechteck	1	1,9 mK	1,0 %
Kombinierte Messunsicherheit					18,1 mK	100 %
Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$)					36 mK	

¹⁾ Bestimmung mit quadratischen Unsicherheiten

Für den Anzeigewert T_A der Memographen kann eine kombinierte Messunsicherheit von 18 mK ermittelt werden. Mit Hilfe des Erweiterungsfaktors $k = 2$ folgt eine erweiterte Messunsicherheit von 36 mK. Der Einfluss durch eine Änderung der Umgebungstemperatur ($\delta T_{A \text{ U}}$) stellt dabei den größten Unsicherheitsbeitrag dar, welcher sich praktisch nur schlecht verringern lässt. Die erweiterte Messunsicherheit stellt dennoch einen mit anderen mehrkanaligen Messgeräten vergleichbar guten Wert dar.

5.2.3 Korrektur durch Vergleichskalibrierungen

Vor Einsatz der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer wurden deren Kennlinien mit Hilfe von Vergleichskalibrierungen (s. Abb. 5.1 oben) ermittelt. Hierzu erfolgte der Vergleich an unterschiedlichen Temperaturpunkten in einem Badthermostat, wobei der spätere Einsatztemperaturbereich bis 150 °C berücksichtigt wurde. Die Erfassung der jeweiligen Badtemperatur T_{Bad} wurde dabei mittels eines kalibrierten Pt10-Normals ($T_{\text{N Bad}}$) und dem Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer ($T_{\text{P Bad}}$) mit Hilfe des Messgerätes Isotech microK 70 realisiert. Die Anzeigewerte $R_{\text{N Bad}}$ des Messgerätes für das Pt10-Normal wurden hierbei unter Verwendung der inversen Abweichungsfunktion $\Delta W_{\text{N}}(T_{\text{N}})$ und den Parametern aus der vorhergehenden Kalibrierung des Pt10-Normals in äquivalente Temperaturen $T_{\text{N Bad kor}}$ umgerechnet. Anhand der gewonnenen Stützstellen $R_{\text{P Bad}}$ und $T_{\text{N Bad kor}}$ konnte durch Approximation mittels eines Polynom 2. Grades die Kennlinie nach DIN EN 60751 [47] mit den Koeffizienten R_{P0} , A_{P} und B_{P} für jedes Prüfstreckenthermometer ermittelt werden. Für die eigentliche Korrektur eines Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometers erfolgt zunächst die Umrechnung des Anzeigewertes T_A des Memographs mit Hilfe der Standardkennlinie nach DIN EN 60751 [47] in den Widerstandswert $R_{A \text{ Std}}$. Anschließend folgt eine Rückrechnung in den korrigierten Wert $T_{A \text{ kor}}$ mit Hilfe der Koeffizienten R_{P0} , A_{P} und B_{P} .

Für die Korrektur ΔT_V der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer durch Vergleichskalibrierungen gehen mit Hilfe der Gleichung

$$\Delta T_V = T_A - T_{A \text{ korre}} + \delta T_{V B} + \delta T_{V N} + \delta T_{V P} + \delta T_{V M} \quad (5.8)$$

nachfolgende Abweichungen bzw. Messunsicherheiten ein. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln angewandt, wird auch hier der beste Schätzwert zu Null gesetzt.

Aus Sichtweise des Badthermostaten Isotech 915 sind mit Hilfe von Gleichung

$$\delta T_{V B} = \delta T_{V B \text{ Stab}} + \delta T_{V B \text{ Hom}} \quad (5.9)$$

folgende einzelne Abweichungen zu berücksichtigen:

$\delta T_{V B \text{ Stab}}$ *Abweichung durch mittels Pt10-Normal gemessene zeitliche Stabilität des Badthermostaten Isotech 915*

Aus einer experimentellen Bestimmung folgt eine Standardmessunsicherheit von 11 mK [125].

$\delta T_{V B \text{ Hom}}$ *Abweichung durch vertikale Homogenität des Badthermostaten Isotech 915*

Laut Datenblatt [126] ergibt sich bei Ölfüllung und 200 °C eine Grenzabweichung von ± 3 mK. Aufgrund des großen Volumens der eingetauchten Zulauf- und Prüfstreckenthermometer wird hier der Wert mit dem Faktor 2 multipliziert, so dass eine Standardmessunsicherheit von $6 \text{ mK} / \sqrt{3}$ folgt.

Durch Betrachtung des Pt10-Normals mit Gleichung

$$\delta T_{V N} = c_{V N \text{ Kal}} \cdot \delta R_{V N \text{ Kal}} + c_{V N \text{ Drift}} \cdot \delta R_{V N \text{ Drift}} + \delta T_{V N \text{ Ew}} + \delta T_{V N \text{ Wa}} \quad (5.10)$$

folgen:

$\delta R_{V N \text{ Kal}}$ *Abweichung durch Kennlinienbestimmung des Pt10-Normals*

Die größte Messunsicherheit ergibt sich bei der Kalibrierung am Indium-Fixpunkt (156,599 °C) mit 0,300 mΩ ($k = 2$) [127]. Daraus folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von 0,150 mΩ.

$\delta R_{V N \text{ Drift}}$ *Abweichung durch eine mögliche Drift des Pt10-Normals*

Ermittlung aus mehreren zeitlich versetzten Messungen [127] am Wassertripelpunkt. Es ist keine eindeutige Driftrichtung zu erkennen, daher wird eine Grenzabweichung von $\pm 0,075$ mΩ angenommen. Unter Annahme einer symmetrischen Rechteckverteilung kann eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $0,075 \text{ mΩ} / \sqrt{3}$ bestimmt werden.

$\delta T_{V N \text{ Ew}}$ *Abweichung durch Eigenerwärmung des Pt10-Normals*

Der Erfahrungswert aus ähnlichen Messungen kann mit einer Grenzabweichung von ± 1 mK abgeschätzt werden. Es folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $1 \text{ mK} / \sqrt{3}$.

$\delta T_{V N \text{ Wa}}$ *Abweichung durch Wärmeableitung des Pt10-Normals*

Der Erfahrungswert aus ähnlichen Messungen kann mit einer Grenzabweichung von ± 1 mK abgeschätzt werden. Somit folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $1 \text{ mK} / \sqrt{3}$.

Für das Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer mit Gleichung

$$\delta T_{V P} = c_{V P \text{ Stab}} \cdot \delta R_{V P \text{ Stab}} + \delta T_{V P \text{ Drift}} + \delta T_{V P \text{ Ew}} + \delta T_{V P \text{ Wa}} + \delta T_{V P \text{ par}} + \delta T_{V P \text{ Hys}} + \delta T_{V P \text{ Ken}} \quad (5.11)$$

ergeben sich:

$\delta R_{V P \text{ Stab}}$ *Abweichung durch mittels Zulauf- und Prüfstreckenthermometer gemessene zeitliche Stabilität*

Die maximale Standardabweichung aller Zulauf- und Prüfstreckenthermometer bei Betrachtung sämtlicher Kalibrierpunkte im Badthermostat beträgt 6,56 mΩ [125] (bei ca. 150 °C Solltemperatur).

$\delta T_{V P \text{ Drift}}$ *Abweichung durch eine mögliche Drift der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer*

Durch mehrmalige Messung aller Zulauf- und Prüfstreckenthermometer am Eispunkt kann eine maximale Differenz von 10,4 mK [125] (beim Zulaufthermometer) festgestellt werden. Mittels symmetrischer Rechteckverteilung kann die Standardmessunsicherheit mit $(10,4 \text{ mK} / 2) / \sqrt{3}$ ermittelt werden.

$\delta T_{V P \text{ Ew}}$ *Abweichung durch Eigenerwärmung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer*

Die Abschätzungen aus Messungen im Badthermostat ergeben eine max. Eigenerwärmung von 10 mK [125]. Durch Annahme einer asymmetrischen Rechteckverteilung folgt eine Standardmessunsicherheit von $10 \text{ mK} / \sqrt{12}$.

$\delta T_{V P \text{ Wa}}$ *Abweichung durch Wärmeableitung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer*

Der Erfahrungswert aus ähnlichen Messungen kann mit einer Grenzabweichung von $\pm 1 \text{ mK}$ abgeschätzt werden. Somit folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $1 \text{ mK} / \sqrt{3}$.

$\delta T_{V P \text{ par}}$ *Abweichung durch parasitäre Thermospannungen der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer*

Durch Umpolung im Messgerät erfolgt eine automatische Thermospannungskompensation, so dass der Einfluss vernachlässigt werden kann.

$\delta T_{V P \text{ Hys}}$ *Abweichung durch Hystereseeffekte der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer*

Bei der Vergleichskalibrierung wurden die Kalibrierpunkte zunächst mit ansteigender und unmittelbar anschließend mit absteigender Solltemperatur bestimmt. Im später relevanten Bereich von 90 °C bis 150 °C beträgt die max. Differenz zwischen ansteigender und absteigender Kennlinie aller Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer 8,5 mK [125]. Die Standardmessunsicherheit kann mit einer symmetrischen Rechteckverteilung zu $(8,5 \text{ mK} / 2) / \sqrt{3}$ bestimmt werden.

$\delta T_{V P \text{ Ken}}$ *Abweichung durch Kennlinienumrechnung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer mit der Standardkennlinie*

Laut DKD-R 5-6 [84] kann eine Grenzabweichung von $\pm 4 \text{ mK}$ angesetzt werden. Demzufolge ist die Standardmessunsicherheit: $4 \text{ mK} / \sqrt{3}$.

Für das Messgerät Isotech microK 70 können dabei mittels Gleichung

$$\delta T_{VM} = c_{VM \text{ Stab}} \cdot \delta R_{VM \text{ Stab}} + c_{VM U} \cdot \delta R_{VM U} + c_{VM \text{ Drift}} \cdot \delta R_{VM \text{ Drift}} \quad (5.12)$$

betrachtet werden:

$\delta R_{VM \text{ Stab}}$ *Abweichung des Messgerätes Isotech microK 70 bei Verwendung der internen Referenzwiderstände*

Laut Datenblatt [128] beträgt die Grenzabweichung $\pm 0,07$ ppm vom Widerstandswert des angeschlossenen Thermometers. Unter der Annahme einer Thermometertemperatur von 150°C folgt aus der Standardkennlinie nach DIN EN 60751 [47] ein Widerstandswert von ca. $157,325 \Omega$. Mittels symmetrischer Rechteckverteilung folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $1,101 \cdot 10^{-5} \Omega / \sqrt{3}$.

$\delta R_{VM U}$ *Abweichung des Messgerätes Isotech microK 70 durch eine mögliche Änderung der Umgebungstemperatur um $\pm 1 \text{ K}$*

Entsprechend Datenblatt [128] folgt bei 1 K Umgebungstemperaturänderung eine Änderung des Widerstandswertes von $0,05$ ppm. Wie bei vorhergehender Abweichung sei der Widerstand für 150°C angenommen. Mittels Rechteckverteilung folgt eine zu vernachlässigende Standardmessunsicherheit von $7,866 \cdot 10^{-6} \Omega / \sqrt{3}$.

$\delta R_{VM \text{ Drift}}$ *Abweichung des Messgerätes Isotech microK 70 durch eine mögliche Langzeitdrift über 10 Jahre*

Aus dem Datenblatt [128] kann eine Drift des internen Referenzwiderstands (100Ω) von 2 ppm entnommen werden. Mittels asymmetrischer Rechteckverteilung folgt eine vernachlässigbare Standardmessunsicherheit von $0,2 \text{ m}\Omega / \sqrt{12}$.

Tab. 5.3 stellt die einzelnen Unsicherheitsbeiträge in der Zusammenfassung dar.

Aus der Gesamtbetrachtung der Unsicherheitsbeiträge folgt für die Korrektur ΔT_V mittels Vergleichskalibrierung aller Zulauf- und Prüfstreckenthermometer eine kombinierte Messunsicherheit von 22 mK . Mittels des Erweiterungsfaktors $k = 2$ kann die erweiterte Messunsicherheit zu 44 mK bestimmt werden. Als deutlichste Unsicherheitsbeiträge weisen sich die zeitlichen Stabilitäten der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer ($\delta T_{VP \text{ Stab}}$) und des Pt10-Normals ($\delta T_{VB \text{ Stab}}$) bei der Messung im Badthermostat aus. Dieser Umstand ließe sich evtl. durch die Verwendung von Temperatur-Fixpunkten für die Kalibrierung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer vermindern, wobei ein Einsatz in den gängigen Fixpunkt-Kalibratoren aufgrund der geometrischen Ausdehnung der Thermometer ausscheidet.

Tab. 5.3: Messunsicherheitsbudget für die Korrektur ΔT_V durch Vergleichskalibrierung der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivität	Messunsicherheitsbeitrag	Anteil ¹⁾
$\delta T_{V B \text{ Stab}}$	0 K	11,0 mK	Normal	1	11,0 mK	25,6 %
$\delta T_{V B \text{ Hom}}$	0 K	3,5 mK	Rechteck	1	3,5 mK	2,5 %
$\delta R_{V N \text{ Kal}}$	0 K	0,2 m Ω	Normal	2,5 K/ Ω	0,4 mK	< 0,1 %
$\delta R_{V N \text{ Drift}}$	0 K	43,3 $\mu\Omega$	Rechteck	2,5 K/ Ω	0,1 mK	< 0,1 %
$\delta T_{V N \text{ Ew}}$	0 K	0,6 mK	Rechteck	1	0,6 mK	0,1 %
$\delta T_{V N \text{ Wa}}$	0 K	0,6 mK	Rechteck	1	0,6 mK	0,1 %
$\delta R_{V P \text{ Stab}}$	0 K	6,6 m Ω	Normal	2,7 K/ Ω	17,6 mK	65,5 %
$\delta T_{V P \text{ Drift}}$	0 K	3,0 mK	Rechteck	1	3,0 mK	1,9 %
$\delta T_{V P \text{ Ew}}$	0 K	2,9 mK	Rechteck	1	2,9 mK	1,8 %
$\delta T_{V P \text{ Wa}}$	0 K	0,6 mK	Rechteck	1	0,6 mK	0,1 %
$\delta T_{V P \text{ par}}$	0 K	0,0 mK	Rechteck	1	0,0 mK	0,0 %
$\delta T_{V P \text{ Hys}}$	0 K	2,4 mK	Rechteck	1	2,4 mK	1,3 %
$\delta T_{V P \text{ Ken}}$	0 K	2,3 mK	Rechteck	1	2,3 mK	1,1 %
$\delta R_{V M \text{ Stab}}$	0 K	6,4 $\mu\Omega$	Rechteck	2,5 K/ Ω	0,0 mK	< 0,1 %
$\delta R_{V M \text{ U}}$	0 K	4,5 $\mu\Omega$	Rechteck	2,5 K/ Ω	0,0 mK	< 0,1 %
$\delta R_{V M \text{ Drift}}$	0 K	57,7 $\mu\Omega$	Rechteck	2,5 K/ Ω	0,1 mK	< 0,1 %
Kombinierte Messunsicherheit					21,7 mK	100 %
Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$)					44 mK	

¹⁾ Bestimmung mit quadratischen Unsicherheiten

5.2.4 Korrektur der Memographen

Da die einzelnen Messkanäle der Memographen werksseitig nicht kalibriert waren, wurden diese vor Beginn der weiteren Messungen mit Hilfe von 2 Widerstandsnormale ($R_{100} = 100 \Omega$ und $R_{200} = 200 \Omega$) im Vorfeld kalibriert. Wie aus dem unteren Bereich der Abb. 5.1 hervorgeht, erfolgte hierzu ein Vergleich des Memographen-Anzeigewert T_{gem} mit dem theoretisch durch die Pt100-Standardkennlinie (s. [47]) bestimmten Temperaturwert T_{Std} der beiden Widerstandsnormale. Mit Hilfe den sich daraus ergebenden Messabweichungen ($\Delta T_{\text{Me}} = T_{\text{gem}} - T_{\text{Std}}$) und Interpolation durch lineare Approximation wurde die Abweichungsfunktion $\Delta T_{\text{Me}}(T_{\text{Std}})$ ermittelt. Somit kann eine Korrektur der jeweilig verwendeten Messkanäle der Memographen erfolgen.

Für die Messunsicherheitsbetrachtung der Korrektur ΔT_{Me} der Memographen werden anhand von Gleichung

$$\Delta T_{\text{Me}} = T_{\text{A korrr}} - T_{\text{Prüf}} + \delta T_{\text{Me Ref Kal}} + \delta T_{\text{Me Ref U}} + \delta T_{\text{Me U}} + \delta T_{\text{A Auf}} + \delta T_{\text{A gem}} \quad (5.13)$$

nachfolgende Abweichungen betrachtet. Wie in den vorhergehenden Kapiteln wird der beste Schätzwert zu Null gesetzt, die Abweichungen sind jedoch unsicherheitsbehaftet.

$\delta T_{\text{Me Ref Kal}}$ *Abweichung durch Messunsicherheit der Widerstandsnormale laut Datenblatt*
Höchster Wert beim 200 Ω -Widerstandsnormal mit 80 ppm [129] erweiterter Messunsicherheit ($k = 2$). Der mittels Pt100-Standardkennlinie und $k = 1$ ausgedrückte Wert für die Standardmessunsicherheit ist 11,1 mK.

$\delta T_{\text{Me Ref U}}$ Abweichung der Umgebungstemperatur bei der hier durchgeführten Kalibrierung von der Umgebungstemperatur laut Datenblatt der Widerstandsnormale

Entsprechend Datenblatt [129] folgt eine Widerstandsänderung in Abhängigkeit von einer Raumtemperaturänderung von ± 2 ppm/K. Die größte Abweichung ergibt sich beim 200 Ω -Widerstandsnormal und der vorherrschenden Umgebungstemperatur mit umgerechnet ± 8 mK. Bei Betrachtung einer symmetrischen Rechteckverteilung kann die Standardmessunsicherheit mit $8 \text{ mK} / \sqrt{3}$ ermittelt werden.

$\delta T_{\text{Me U}}$ Abweichung durch den Einfluss der Umgebungstemperatur

Ermittlung der Abweichung anhand von Messungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und einem 200 Ω -Widerstandsnormal an allen Messkanälen. Für eine Erhöhung der Umgebungstemperatur um 5,3 K folgt ein um max. 30 mK höherer Anzeigewert der Memographen. Für eine Änderung der Umgebungstemperatur während der Kalibrierungen um ± 2 K kann somit eine Standardmessunsicherheit von $11,3 \text{ mK} / \sqrt{3}$ abgeschätzt werden.

Da hier keine korrelierten Einflussgrößen betrachtet werden, gehen die in Kap. 5.2.2 betrachteten Unsicherheiten $\delta T_{\text{A Auf}}$ und $\delta T_{\text{A gem}}$ direkt in die Unsicherheitsbetrachtungen mit ein. Es ergeben sich dann die Tab. 5.4 zusammengefassten Unsicherheitsbeiträge der Abweichungen.

Tab. 5.4: Messunsicherheitsbudget für die Korrektur ΔT_{Me} der Memographen

Größe	Schätz- wert	Standardmess- unsicherheit	Verteilung	Sensitivität	Messunsicher- heitsbeitrag	Anteil ¹⁾
$\delta T_{\text{Me Ref Kal}}$	0 K	11,1 mK	Normal	1	11,1 mK	57,9 %
$\delta T_{\text{Me Ref U}}$	0 K	4,7 mK	Rechteck	1	4,7 mK	10,3 %
$\delta T_{\text{Me U}}$	0 K	6,5 mK	Rechteck	1	6,5 mK	20,0 %
$\delta T_{\text{A Auf}}$	0 K	0,3 mK	Rechteck	1	0,3 mK	< 0,1 %
$\delta T_{\text{A gem}}$	0 K	5,0 mK	Normal	1	5,0 mK	11,7 %
Kombinierte Messunsicherheit					14,6 mK	100 %
Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$)					30 mK	

¹⁾ Bestimmung mit quadratischen Unsicherheiten

Es ergibt sich eine kombinierte Messunsicherheit für die Korrektur ΔT_{Me} der Memographen von 15 mK. Mit einem Erweiterungsfaktor $k = 2$ folgt eine erweiterte Messunsicherheit von 30 mK. Der größte Einfluss kann durch die Kalibrierung der Widerstandsnormale ($\delta T_{\text{Me Ref Kal}}$) identifiziert werden. Dieser Einfluss könnte evtl. durch die Wahl anderer Widerstandsnormale mit geringerer Messunsicherheit reduziert werden, welche jedoch hier nicht zur Verfügung standen.

5.3 Gesamtmessunsicherheit und Bewertung

In der Gesamtbetrachtung aller Einzelkomponenten des vorhergehenden Kap. 5.2 kann eine kombinierte erweiterte Gesamtmessunsicherheit U von 130 mK ($k = 2$) für die Bestimmung der gemessenen und korrigierten Mediumstemperatur $T_{\text{Prüf}}$ ermittelt werden. Mögliche Korrelationen der Standardunsicherheiten wurden vernachlässigt, was für die hier betrachtete Messkette als ausreichend angesehen werden kann. In Anbetracht, dass sich bei den einzelnen Unsicherheitsbeiträgen an der jeweils größtmöglichen Messunsicherheit bei einer Vielzahl von Thermometern, Messkanälen etc. orientiert wurde, stellt die erweiterte Gesamtmessunsicherheit einen vergleichbar guten Wert dar. Dadurch kann zudem die erweiterte Gesamtmessunsicherheit auf die Temperaturmessung aller Zulauf- und Prüfstreckenthermometer übertragen werden. Weiterhin lässt sich die erweiterte Gesamtmessunsicherheit aufgrund der Verwendung des gleichen Sensortyps sowie einer ähnlich durchgeführten Vergleichskalibrierung auch auf die Temperaturmessung des durchschiebbaren Thermometers (DST) übertragen.

Durch Einzelbetrachtung bspw. eines Prüfstreckenthermometers, welches an einem Messkanal des Memographs angeschlossen ist und bei einer Solltemperatur betrieben wird, folgt somit u. U. eine geringere erweiterte Gesamtmessunsicherheit für dessen gemessene Temperatur. Aufgrund der Vielzahl der Thermometer wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher darauf eingegangen.

Für die praktisch zu erwartenden Messabweichungen zwischen der Mediumstemperatur und der Sensortemperatur der Rohranlegethermometer im einstelligen Kelvin-Bereich kann mittels der hier bestimmten erweiterten Gesamtmessunsicherheit von einer prinzipiellen Eignung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer zur Referenzmessung der Sattdampftemperatur in den Prüfstreckenrohren ausgegangen werden.

6. Erprobung und Vergleich verschiedener Rohranlegethermometer

Anhand von ausgewählten Rohranlegethermometern werden diese hinsichtlich ihrer charakterisierenden Eigenschaften untersucht und miteinander verglichen. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf den erzielbaren Messabweichungen von der Mediumtemperatur. Dabei werden Einflussfaktoren wie bspw. die Montage, eine erzwungene Konvektion oder die Verwendung einer Isolierung näher ergründet und ihre Auswirkungen erörtert.

6.1 Überblick der untersuchten Rohranlegethermometer

Obwohl am Prüfstand unterschiedlichste Rohrdurchmesser verwendet werden können, wird sich für die nachfolgenden Untersuchungen auf Rohranlegethermometer beschränkt, welche laut Hersteller für ein DN ½"-Rohrdurchmesser nach DIN 11866 [66] angepasst sind. Aufgrund der Tatsache, dass mittels Widerstandsthermometern geringere prinzipbedingte Kennlinienfehler als bspw. bei Thermoelementen zu erwarten sind, werden ausschließlich Thermometer auf Basis von Pt100-Sensorelementen betrachtet. Auch sollen verschiedene Befestigungsarten sowie -materialien zur Anwendung kommen. Insgesamt werden somit 4 verschiedene Bautypen von unterschiedlichen Herstellern nähergehend untersucht.

Abb. 6.1 gibt die verwendeten Rohranlegethermometer anschaulich wieder.



Abb. 6.1: Untersuchte Rohranlegethermometer, v. l. n. r.: Labom GA2610, Sensonic TMPT100A, Wika TR57-M und E+H ZGT4

Außer dem TMPT100A der Firma Sensonic ApS, welcher mittels Kabelbinder oder Spannbändern am Rohr befestigt wird, basieren alle 3 anderen Rohranlegethermometer auf einer Halbschalenbefestigungsmöglichkeit. Diese sind das GA2610 der Firma Labom Mess- und Regeltechnik GmbH, das TR57-M der Firma WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG und das ZGT4 der Firma Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG. Von einigen der untersuchten Rohranlegethermometern stehen dabei mehrere baugleiche Muster zur Verfügung.

Alle wesentlichen Eigenschaften aus den Herstellerangaben sind in Tab. 6.1 zusammengefasst. Auffällig ist dabei, dass der maximal zulässige Messbereich mit Ausnahme des TMPT100A auf 150 °C festgelegt ist, was vermutlich ursächlich auf die verwendeten Kunststoffmaterialien zurückzuführen ist. Mit Ausnahme eines Rohranlegethermometers ist bei allen anderen laut Hersteller eine Wärmeleitpaste erforderlich. Hierzu wird einheitlich die

Wärmeleitpaste WLPK der Firma Fischer Elektronik GmbH & Co. KG verwendet. Diese silikonfreie, keramisch verfüllte Wärmeleitpaste ermöglicht mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_K von 10 W/(m K) [130] einen vergleichsweise guten Wärmeübergang zwischen dem Temperaturfühler des Rohranlegethermometers und der Rohroberfläche.

Tab. 6.1: Eigenschaften der untersuchten Rohranlegethermometer, Herstellerangaben

Hersteller Typ	Labom GA2610 [80, 131]	Sensonic TMPT100A [79]	Wika TR57-M [132, 133]	E+H ZGT4 [134, 135]
Zulässiger Messbereich in °C	-40 ... 150	-40 ... 180	-20 ... 150	-50 ... 150
Genauigkeitsklasse nach DIN EN 60751 [47]	A	1/3 B	A	A
Anschlussart	3-Leiter	4-Leiter	3-Leiter	4-Leiter
Angabe zu erzielbaren Messabweichungen ¹⁾	100 ... 150 °C: ($T_U - T_M$) · 0,01 K	($T_U - T_M$) · 0,03 K	2,5 % vom Endwert	k. A.
Wärmeleitpaste erforderlich	ja	ja	ja	nein
Temperaturfühler an Rohrkrümmung angepasst	ja	ja	nein	ja
Temperaturfühler ohne Demontage herausnehmbar	ja	nein	ja	teilweise
Temperaturfühler kalibrier- bar im Badthermostat	ja, teilweise	nein, nicht direkt	ja, teilweise	ja, vollständig
Anpressfeder	ja	nein	ja	ja
Verdrehsicherung am Rohr	ja	nein	nein	nein

¹⁾ Mediumtemperatur: T_M , Umgebungstemperatur: T_U

Für die experimentellen Untersuchungen werden zur Montage bzw. Demontage der Rohranlegethermometer immer, soweit vorhanden, die Herstellervorgaben genau befolgt.

Um eine objektive Betrachtung zu ermöglichen, werden die ausgewählten Rohranlegethermometer im Folgenden anonymisiert mit den Kurzbezeichnungen A1, B1, C1 und D1 betrachtet. Mehrere baugleiche Muster eines Rohranlegethermometers werden dabei durch eine aufsteigende Nummerierung gekennzeichnet.

Die Vielseitigkeit der möglichen Messungen mit den ausgewählten Rohranlegethermometern kann der Messplanstruktur in Abb. A4 entnommen werden. In den nachfolgenden Kapiteln werden dazu Messungen u. a. anhand wesentlicher theoretischer Einflussgrößen (s. Kap. 2.2) nähergehend betrachtet.

6.2 Korrektur der Sensorkennlinie

Vor Beginn der Messreihen wurden alle Rohranlegethermometer (ohne Befestigungssystem) einer Vergleichskalibrierung in einem Badthermostat unterzogen. Wie bereits einleitend erwähnt, ist zwar eine solche Kalibrierung nicht zur Angabe von erzielbaren Gesamtmessabweichungen geeignet, da die Einsatz- und Umgebungsbedingungen vom realen Anwendungsfall stark abweichen, jedoch können zumindest die Messabweichungen der Sensorkennlinie annähernd bestimmt und anschließend korrigiert werden.

Analog zur Vergleichskalibrierung der Prüfstreckenthermometer (s. Kap. 5.2.3) kam für die Kalibrierungen der Rohranlegethermometer der Überlaufbadthermostat 915 [136, 137] und das Messgerät microK 70 [128] der Fa. Isothermal Technology Ltd. zum Einsatz. Als Vergleichsnormale wurde ein rückführbar kalibriertes Pt10-Normal genutzt (s. [138]). Außer

dem Temperaturfühler des ZGT4, welcher ohne besondere Vorkehrungen vollständig in den Badthermostaten eingetaucht werden konnte, musste bei den Temperaturfühlern vom GA2610 und TR57-M die Eintauchtiefe so variiert werden, dass ein Einfluss durch Wärmeableitung an die Umgebung ausgeschlossen werden konnte. In Temperierungsschritten von 10 K wurden im Bereich von 80 °C bis 150 °C die Temperaturmesswerte der Temperaturfühler in Abhängigkeit von der Referenztemperatur des Pt10-Normals bestimmt. Eine Ausnahme stellte hierbei das Thermometer TMPT100A dar, was aufgrund seiner Bauform mittels eines vollständig eingetauchten Schutzbeutels nur im Bereich von 60 °C bis 100 °C in 10 K-Schritten gemessen wurde. Durch Approximation unter Verwendung eines Polynoms 2. Grades und der aufgenommenen Messpunkte konnten anschließend die korrigierten Koeffizienten für eine thermometerspezifische Kennlinie nach DIN EN 60751 [47] ermittelt werden.

Für alle folgenden Messungen werden, soweit nicht anders erwähnt, die korrigierten Kennlinien für die Rohranlegethermometer verwendet.

6.3 Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage

Ein Großteil der Hersteller bewirbt seine Produkte mit der vorteilhaften Aussage, dass eine leichte Montage sowie Demontage für bspw. Kalibrierzwecke der Rohranlegethermometer möglich ist. Erste Versuche (vgl. [114]) haben jedoch gezeigt, dass allein die Montage bzw. Demontage große Streuungen der Messabweichungen der Thermometer von der Mediumstemperatur bedingen können. Aus diesem Grund wurden für alle Rohranlegethermometer Messungen unter möglichst reproduzierbaren Bedingungen wiederholt durchgeführt. Hierbei wurde nachfolgende Vorgehensweise zum Anklemmen, Messen und Abklemmen der Rohranlegethermometer angewandt:

1. konstante Temperierung der Prüfstrecke mit einer Solltemperatur von ca. 150 °C
2. Entnahme des Temperaturfühlers, wobei die Halbschalen zur Rohrbefestigung ortsfest an der Prüfstrecke verbleiben und somit nur zu Beginn einmalig befestigt werden, Ausnahme: beim TMPT100A ist nur eine komplette Demontage des Thermometers möglich
3. Reinigung des Temperaturfühlers mit Aceton
4. Reinigung des Temperaturfühlers mit Ethanol
5. Reinigung der Messstelle am Rohr mit Ethanol
6. dünnes Aufbringen von Wärmeleitpaste, sofern vom Hersteller vorgesehen
7. Einsatz des Temperaturfühlers
8. Anziehen der Schraubverbindungen mittels Drehmomentschlüssel nach Herstellervorgabe bzw. beim TMPT100A mit hochtemperaturstabilen Kabelbindern
9. Warten, bis Thermometer ihren statischen Endwert erreichen
10. Bildung des Mittelwertes ΔT_x aus der Messabweichung der Temperatur T_x des jeweiligen Rohranlegethermometers abzüglich der Prüfstreckentemperatur $T_{\text{Prüf}}$ und der Standardabweichung $s(\Delta T_x)$ über eine Messdauer von ca. 30 min
11. Wiederholung der Vorgehensweise ab 2.

Zunächst sollen die 3 bauartgleichen Thermometer A1 – 3 näher betrachtet werden. Beginnend mit der metallblanken Prüfstrecke wurde A1 an der oberen, A2 an der mittigen und A3 an der unteren Messposition befestigt. Anschließend wurde vorgenannte Vorgehensweise zum Anklemmen, Messen und Abklemmen insgesamt 21 Mal wiederholt

(Ergebnisse s. Tab. A2). Die Umgebungstemperatur wies während der Messungen eine Grenzabweichung von $\pm 0,6$ K auf und konnte somit vergleichsweise sehr stabil gehalten werden. Aus Abb. 6.2 ist ersichtlich, dass A1 eine deutlich geringere Streuung (Standardabweichung s_{A1} der einzelnen ΔT_{A1} : 0,237 K) als A2 ($s_{A2} = 0,452$ K) und A3 ($s_{A3} = 1,060$ K) aufweist. Bei Betrachtung des Mittelwertes der einzelnen Messabweichungen ΔT_{A1-3} treten zudem deutliche Unterschiede auf. Während A1 hier einen Wert von -5,174 K aufzeigt, liegt dieser für A2 bzw. A3 bei -9,680 K bzw. -9,177 K. Es zeigt sich somit eine erhebliche Diskrepanz der Messabweichungen ΔT_{A1-3} schon innerhalb einer Bauform.

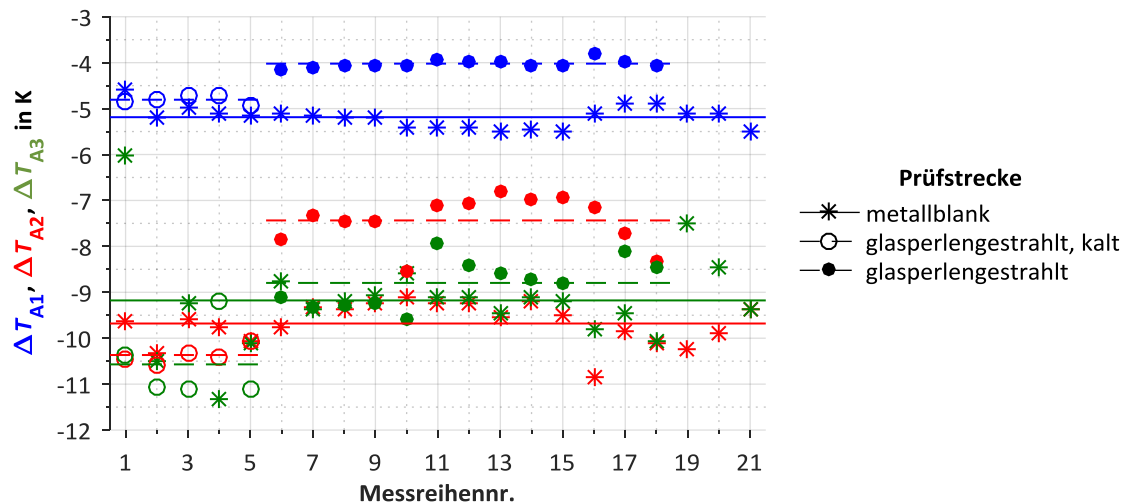


Abb. 6.2: Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage mit Messabweichung ΔT_{Ax} , Thermometer A1 – 3, $T_{\text{Prüf}}$ konst. ≈ 150 °C, kalt: Zwischenabkühlung mit $T_{\text{Prüf}} \approx T_{\text{Umg}}$, Gerade: Mittelwert

In Analogie zur Messung an der metallblanken Prüfstrecke erfolgte weiterhin eine Untersuchung der Rohranlegethermometer A1 – 3 an der glasperlengestrahlten Prüfstrecke (Ergebnisse s. auch Tab. A3). Für die ersten 5 Messreihen wurde das An- und Abklemmen der Temperaturfühler, im Gegensatz zu der eingangs beschriebenen allgemeinen Vorgehensweise, erst nach dem Abkühlen der Prüfstrecke auf annähernd Umgebungstemperatur durchgeführt. Im Vergleich dazu ergeben sich bei allen Thermometern A1 – 3 an der glasperlengestrahlten Prüfstrecke größere Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_{A1-3}|$ als bei konstanter Temperierung der Prüfstrecke mit ca. 150 °C. Mögliche Ursachen hierfür sind in unterschiedlichen mechanischen Spannungen der Schraubverbindungen und Anpressfedern sowie verwendeten Materialpaarungen zu finden. So kann sich bspw. das bei der Montage angewandte Drehmoment der Schraubverbindungen in Folge einer Temperaturänderung verändern. Schlussfolgernd zeigt sich somit, dass die bei der (De-) Montage vorliegende Rohraußenwandtemperatur direkt auf die später erzielbaren Messabweichungen ΔT_{A1-3} Einfluss haben kann. Unter vergleichbaren Bedingungen (konst. Temperierung der Prüfstrecke mit ca. 150 °C) können jedoch für Messungen am glasperlengestrahlten Prüfstreckenrohr geringere Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_{A1-3}|$ als am metallblanken Rohr erzielt werden (vgl. Tab. 6.2). Wie aus Tab. 6.3 hervorgeht, sind tendenziell auch die Streuungen s_{A1-3} geringer. Eine Untersuchung der Ursachen für die nahezu doppelt so großen Beträge der Messabweichungen der Thermometer A2 – 3 gegenüber A1 findet sich in Kap. 6.4.

Durch gleichartige Untersuchungen von B1 sowie C1 (s. Tab. A4) und D1 – 2 (s. Tab. A5) können die in Abb. 6.3 grafisch dargestellten Messergebnisse gewonnen werden. Da die

hierbei verwendete gebeizte Prüfstrecke eine ähnliche Oberflächenrauigkeit wie die glasperlengestrahlt besitzt (vgl. Kap. 4.2.1), ist auch eine Vergleichbarkeit mit den Thermometern A1 – 3 gegeben. Es fällt auf, dass die Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_x|$ von B1, C1 und D1 – 2 deutlich kleiner als bei A1 – 3 ausfallen (vgl. Tab. 6.2), was in den nachfolgenden Kapiteln näher untersucht werden soll.

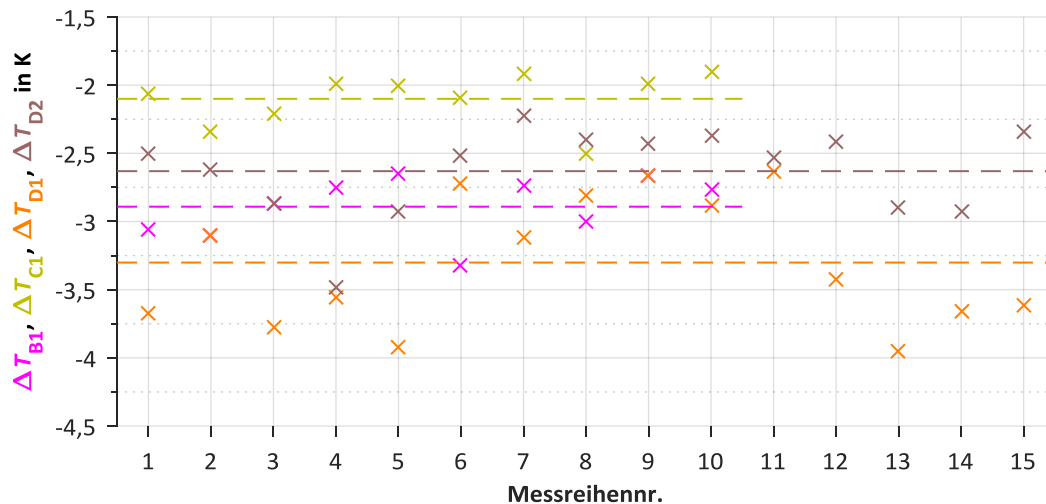


Abb. 6.3: Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage am gebeizten Prüfstreckenrohr mit Messabweichung ΔT_x , Thermometer B1, C1 und D1 – 2, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$, Gerade: Mittelwert

Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Rohranlegethermometern zu ermöglichen, sind deren Mittelwerte der einzelnen Messabweichungen ΔT_x sowie Streuungen s_x durch (De-) Montage bei einer konstanten Prüfstreckentemperatur von ca. 150°C in Tab. 6.2 bzw. Tab. 6.3 zusammengefasst.

Tab. 6.2: Mittelwerte der einzelnen Messabweichungen ΔT_x durch (De-) Montage aller Rohranlegethermometer an unterschiedlichen Rohroberflächen, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$

Rohroberfläche	Mittelwert von ΔT_x in K für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
metallblank	-5,187	-9,680	-9,177	-	-	-	-
glasperlengestrahlt	-4,021	-7,435	-8,796	-	-	-	-
gebeizt	-	-	-	-2,891	-2,101	-3,301	-2,631

Tab. 6.3: Übersicht der Streuungen durch (De-) Montage aller Rohranlegethermometer (Standardabweichung s_x aller einzelnen Messabweichungen ΔT_x), $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$

Rohroberfläche	Standardabweichung s_x in K für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
metallblank	0,237	0,452	1,060	-	-	-	-
glasperlengestrahlt	0,090	0,544	0,513	-	-	-	-
gebeizt	-	-	-	0,220	0,195	0,474	0,331

Während für A1 am glasperlengestrahlt Rohr die geringste Streuung ($s_{A1} = 0,090\text{ K}$) aller untersuchten Konstellationen angegeben werden kann, zeigen sich selbst bei bauartgleichen Thermometern z. T. deutliche Unterschiede. So weist A3 eine mehr als 4 Mal größere Streuung ($s_{A3} = 1,060\text{ K}$) am metallblanken Prüfstreckenrohr als A1 auf. Auch bei D1 – 2 ergeben sich Unterschiede in der Streuung, die jedoch mit $0,474\text{ K}$ bei D1 gegenüber $0,331\text{ K}$

bei D2 gering ausfallen. Bei D1 – 2 fällt zudem die relativ große Differenz zwischen den gemessenen Mittelwerten der Messabweichungen auf, wobei sich für D1 -3,301 K und für D2 -2,631 K ergeben.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage der Rohranlegethermometer selbst unter vergleichsweise idealen Laborbedingungen starken Streuungen der Messabweichungen unterworfen ist. Aus den durchgeführten Messungen ist diese große Fehlerquelle gut erkennbar. Im realen Anwendungsfall sind noch deutlich größere Streuungen zu erwarten, da bspw. die Messstelle am Rohr verschmutzt oder zerkratzt sein kann. Im Feld sind zudem weitere Anwenderfehler, wie z. B. das Nichtbeachten der Montagehinweise, zu erwarten. Zusätzlich kann sich die Messposition am Rohr nachteilig verändern, wenn neben dem Temperaturfühler auch die Halbschalen zur Rohrbefestigung an- bzw. abgeklemmt werden. Die korrekte praktische Handhabung von den, laut Herstellern z.T. vorgegebenen, kleinen Drehmomenten zur Befestigung kann ebenfalls angezweifelt werden. Hinzu kommt, dass auch die Temperatur des Rohres bei der Montage einen großen Einfluss auf die später folgenden Messabweichungen haben kann.

6.4 Messabweichung von der Mediumstemperatur

Für den Anwender von zentraler Bedeutung sind die erzielbaren Messabweichungen der vom Rohranlegethermometer gemessenen Temperatur abhängig von der Mediumstemperatur im Rohr. Dazu wurden an verschiedenen Oberflächen der Prüfstrecken zunächst Temperierungen mit ortsfesten Rohranlegethermometern bei einer Solltemperatur T_{Soll} von 100 °C bis 150 °C in 10 K-Schritten durchgeführt. Pro Temperierungsstufe wurde über eine Messdauer von ca. 30 min aus der Temperatur des Rohranlegethermometers T_x abzüglich der Prüfstreckentemperatur $T_{\text{Prüf}}$ bzw. der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers T_{DST} die Messabweichung ΔT_x bestimmt.

Abb. 6.4 stellt für die Thermometer A1 – 3 die Messabweichungen in Abhängigkeit von der Solltemperatur für die metallblanke sowie glasperlengestrahlte Prüfstrecke dar (Ergebnisse s. auch Tab. A6 und Tab. A7).

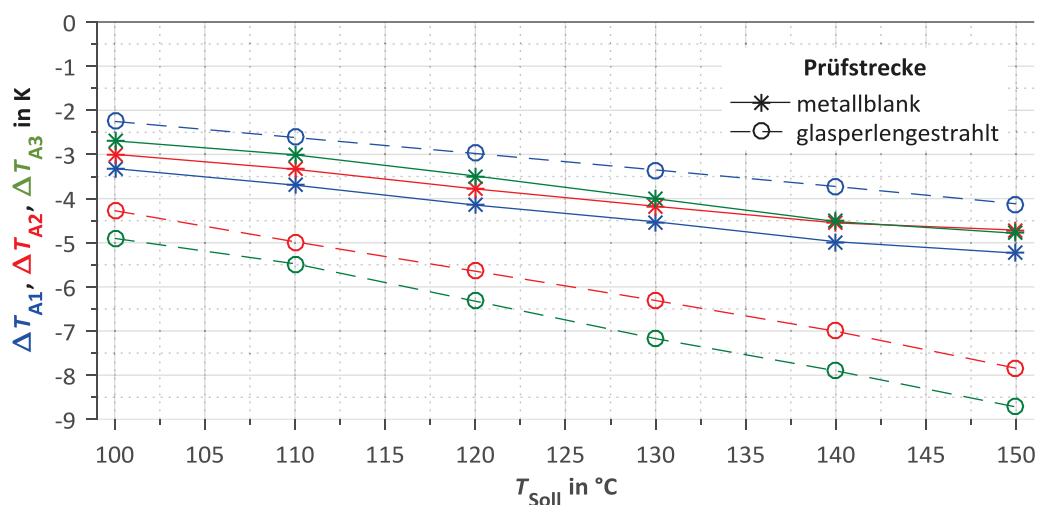


Abb. 6.4: Messabweichung ΔT_{Ax} von der Prüfstreckentemperatur in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums an verschiedenen Rohroberflächen, Thermometer A1 – 3

Während am metallblanken Rohr die Messwerte von A1 – 3 dicht beieinanderliegen, zeigen sich bei Messung mit der glasperlengestrahlten Rohroberfläche deutliche Unterschiede zwischen den Thermometern. Auf der einen Seite zeigen A2 und A3 deutlich größere Beträge der Messabweichungen der glasperlengestrahlten gegenüber der metallblanken Prüfstrecke. Auf der anderen Seite ergibt sich bei A1 an der glasperlengestrahlten Prüfstrecke ein kleinerer Betrag der Messabweichung als an der metallblanken. Im Vergleich der Messabweichungen bei einer Solltemperatur von 150 °C mit den im vorherigen Kap. 6.3 aufgenommenen gemittelten Messabweichungen fällt auf, dass an der glasperlengestrahlten Prüfstrecke die Messabweichungen gut für alle Thermometer A1 – 3 übereinstimmen. An der metallblanken Prüfstrecke ergibt sich jedoch ein anderes Bild, A1 zeigt eine gute Übereinstimmung, während A2 – 3 ungefähr dem Betrage nach halb so große Messabweichungen aufweisen.

Aufgrund dieser zu Tage tretenden großen Unterschiede innerhalb der gleichen Bauform wurde die geometrische Beschaffenheit der Temperaturfühler von A1 – 3 näher untersucht. Hierzu wurde im unmittelbaren Bereich des eingelassenen Sensors über dessen konkave Oberfläche mit Hilfe eines Fokussensors die geometrische Vertiefung z bestimmt, s. Abb. 6.5.

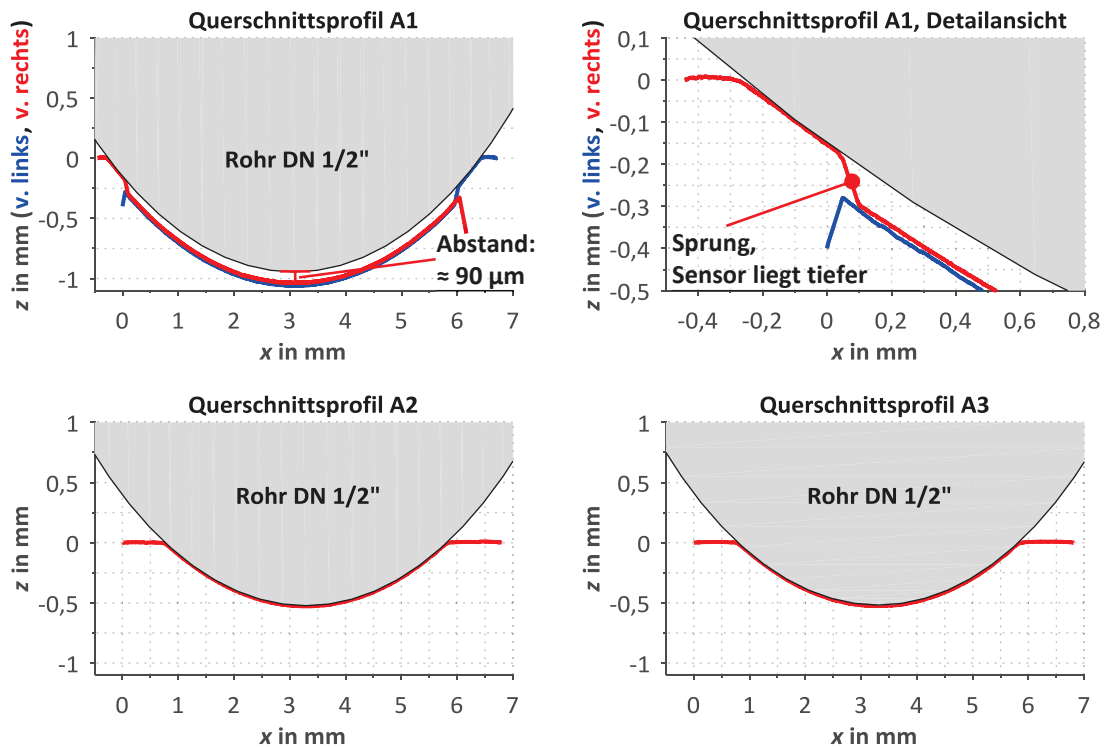


Abb. 6.5: Querschnittsprofile des eingelassenen Sensors von A1 – 3 über dessen Mittelpunkt mit theoretisch eingezeichnetem angelegtem DN 1/2"-Rohr

Für A1 ergibt sich ein Sprung im aufgenommenen Querschnittsprofil, der durch einen tieferliegenden Sensor verursacht wurde. Durch Betrachtung des Krümmungsradius r_K des Querschnittsprofils zeigt sich nur für A2 und A3 ($r_K \approx 6,4 \text{ mm}$) eine nahezu identische Übereinstimmung mit dem eines DN 1/2"-Rohres ($r_K = 6,35 \text{ mm}$), was zunächst einen besseren thermischen Kontakt zwischen Temperaturfühler und Rohr als bei A1 ($r_K \approx 6,0 \text{ mm}$) vermuten lässt. Mittels theoretischen Anlegens eines DN 1/2"-Rohres folgt jedoch für A1 eine größere Öffnungsbreite (Sehne b des Rohraußendurchmessers bestimmt bei $z \approx 0$) mit $b \approx 6,7 \text{ mm}$ als bei A2 und A3 ($b \approx 5,1 \text{ mm}$). Aus den gewonnenen Schnittprofilen ergeben

sich somit 2 Gruppierungen: A1 und A2 – 3. Trotz Ausprägung eines, durch einen Luftspalt verursachten, schlechteren thermischen Kontaktes im direkten Sensorbereich werden jedoch bei A1 z. T. geringere Beträge der Messabweichungen erreicht. Ursächlich dafür könnte evtl. der bessere thermische Kontakt im Umfeld des Sensorelementes von A1 sein, welcher bspw. den seitlichen Wärmeeintrag in das Sensorelement erhöht und somit zu geringeren Wärmetransportvorgängen an die Umgebung führt. Andere mögliche Ursachen sind u. U. in einer abweichenden Rohrkrümmung im Praxisfall, aber auch im schlechteren Anklemmverhalten an das Rohr der Temperaturfühler von A2 – 3 zu finden.

Im Vergleich von A1, B1, C1, D1 und D2 (siehe Abb. 6.6) zeigen sich für B1 und C1 nahezu identische Verläufe der Messabweichungen in Abhängigkeit von der Solltemperatur. Ein Einfluss von der metallblanken bzw. gebeizten Rohroberfläche auf die Messwerte ist bei den beiden Thermometern nicht zu erkennen.

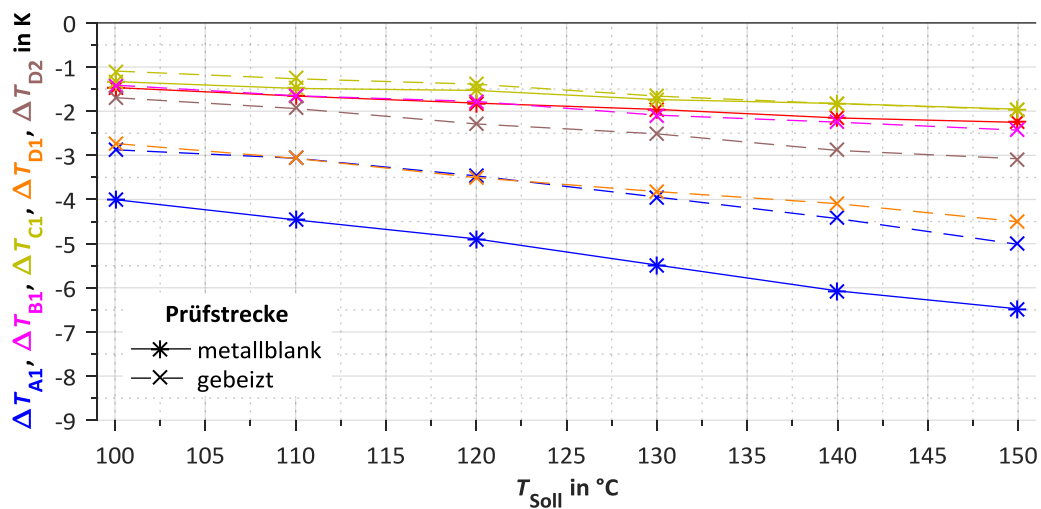


Abb. 6.6: Messabweichung ΔT_x in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums, z. T. an verschiedenen Rohroberflächen, Thermometer A1, B1, C1, D1 und D2

Unterschiede zwischen den bauartgleichen Thermometern D1 und D2 ergeben sich, wie auch bereits bei den Reproduzierbarkeitsmessungen gezeigt wurde, in den Messabweichungen, wobei D2 über der Solltemperatur T_{Soll} stets einen kleineren Betrag $|\Delta T_{D2}|$ der Messabweichung als D1 besitzt.

Insgesamt betrachtet ergeben sich bei C1 die geringsten Beträge der Messabweichungen über den Gesamtbereich.

In Analogie zu Gl. (2.18) kann der Kopplungsfaktor B bestimmt werden. Als Referenz für die Mediumstemperatur kann hier die jeweilige Prüfstreckentemperatur $T_{\text{Prüf}}$ eingesetzt werden, so dass gilt:

$$B = \frac{|T_x - T_{\text{Prüf}}|}{|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|} = \frac{|\Delta T_x|}{|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|} \quad (6.1)$$

Der Kopplungsfaktor B stellt die Empfindlichkeit der Messabweichung $|\Delta T_x|$ auf die Temperaturdifferenz $|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|$ zwischen Prüfstrecken- und Umgebungstemperatur dar. Im Gegensatz zur reinen Betrachtung der Messabweichungen ΔT_x werden somit auch Änderungen der Umgebungstemperatur zwischen den durchgeführten Messungen berücksichtigt.

Abb. 6.7 stellt die Kopplung der Rohranlegethermometer als Abhängigkeit vom Zähler (Ordinate) zum Nenner (Abszisse) des Kopplungsfaktors dar.

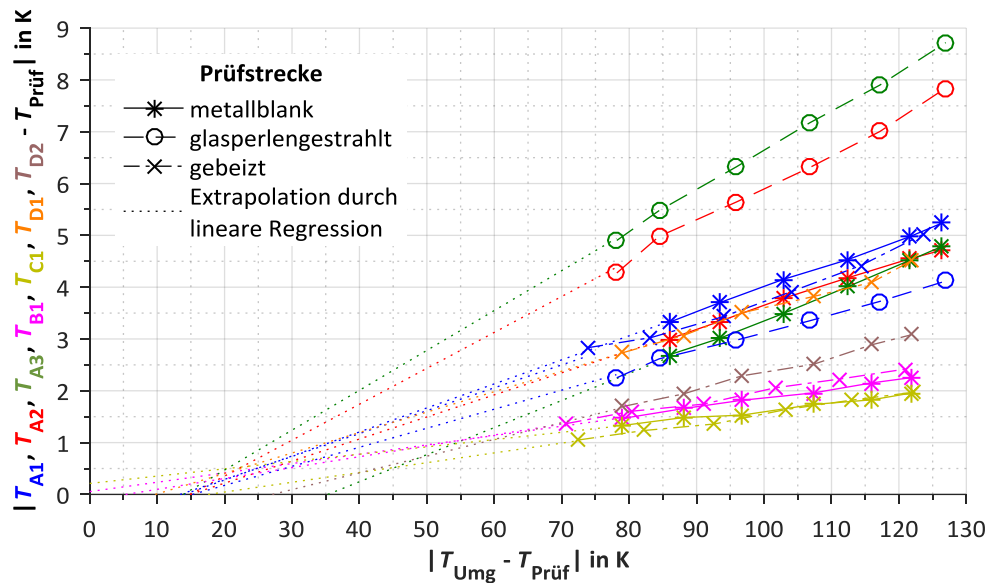


Abb. 6.7: Thermische Kopplung bei den Thermometern A1, A2, A3, B1, C1, D1 und D2 an verschiedenen Prüfstreckenrohren

Entsprechend der Theorie, dass bei keiner Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Medium auch die Messabweichung der Thermometer Null ist, sollte sich ein Schnittpunkt aller Kennlinien bei Null ergeben. Wie in Kap. 2.2.8 theoretisch gezeigt wurde, kann die Messabweichung zwischen ungestörter Rohraußenwandtemperatur und Medium zur Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Medium bei einer konstanten Umgebungstemperatur als annähernd linearer Verlauf beschrieben werden.

Mittels Extrapolation durch lineare Regression aller Kennlinien ergeben sich jedoch für die wenigsten Extrapolationen Schnittpunkte nahe Null. In Abb. 6.7 auffällig ist hierbei der gemeinsame Schnittpunkt von 6 der 13 Kennlinien bei ca. 15 K auf der Abszisse ($|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|$). Dies könnte ein Indiz für eine falsche Bestimmung der Umgebungstemperatur sein. Eine korrekte Erfassung der Umgebungstemperatur stellt sich allerdings als schwierig dar, da die Messposition des Umgebungsthermometers zum einen nicht unmittelbar durch die Prüfstrecke beeinflusst sein darf (z. B. durch Wärmestrahlung), aber andererseits keinen zusätzlichen Störungen aus der Umgebung unterworfen ist. Es ist weiterhin zu bedenken, dass aufgrund der geringen Anzahl von Stützstellen für die Regression mit erheblichen Abweichungen bei den sich ergebenden Schnittpunkten mit der Abszisse zu rechnen ist. Zudem ist zu beachten, dass die theoretischen Berechnungen des Kap. 2.2.8 nur für den Fall einer ungestörten Rohraußenwandtemperatur gelten und sich somit praktisch ein anderer Zusammenhang der Kopplung ergeben kann.

Mit Hilfe der vorgenannten linearen Regression kann der Kopplungsfaktor B der einzelnen Thermometer ermittelt werden, siehe Tab. 6.4.

Tab. 6.4: Kopplungsfaktor B der Messabweichung $|\Delta T_x|$ auf die Temperaturdifferenz $|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|$ bei annähernd konst. Umgebungstemperatur T_{Umg}

Rohroberfläche	Kopplungsfaktor $B (= \Delta T_x / T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}})$ für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
metallblank	0,046	0,043	0,052	0,018	0,014	-	-
glasperlengestrahlt	0,037	0,069	0,077	-	-	-	-
gebeizt	0,044	-	-	0,021	0,019	0,039	0,032

Den geringsten Kopplungsfaktor B (Steigung) der Messabweichungen ΔT_x in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}$ zwischen Umgebung und Medium weisen C1 und B1 auf. Diese Kopplungsfaktoren sowie Messabweichungen sind zudem unabhängig von der verwendeten Prüfstreckenoberfläche. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei A1 – 3 sowohl ein höherer Kopplungsfaktor als auch Unterschiede in den Messabweichungen in Abhängigkeit von der Rohroberfläche. Für D1 – 2 zeigen sich Kopplungsfaktoren in ähnlicher Größenordnung wie bei A1. Zwischen den beiden Thermometern D1 – 2 ist jedoch ein deutlicher Offset der Messabweichungen zu erkennen. Zu einer möglichen Ursache dieses Offsets sei auf die Untersuchungen in Kap. 6.7.4 verwiesen.

Im Mediumtemperaturbereich von 100 °C bis 150 °C und mit den hier vorliegenden Messbedingungen sind aus Sichtweise der erreichbaren Messabweichungen die Rohranlegethermometer C1 und B1 als am geeignetsten anzusehen.

6.5 Einfluss von erzwungener Konvektion

Im praktischen Einsatz spielt die Konvektion im Umfeld eines Rohres mit angekoppeltem Rohranlegethermometer eine wichtige Rolle. Zum einen kann dies freie Konvektion ausgehend durch die Raumbedingungen mit z. B. umgegebenen Rohrleitungen oder Maschinenteilen sein. Zum anderen kann es auch zur Ausprägung von erzwungener Konvektion, bspw. durch in der Nähe befindliche Lüfter, kommen. Diese ungewollte Konvektion im Umfeld ist je nach Anlagenprozess häufig schlecht beeinflussbar und schwer im Vorfeld vorhersagbar. Aus diesen Gründen wurde mit Hilfe des Prüfstand-Lüfters (vgl. Kap. 3.4.11) eine erzwungene Konvektion nachgebildet und deren Einfluss auf die Messergebnisse der Rohranlegethermometer untersucht.

In Analogie zu Kap. 6.4 wurden zunächst die Messabweichungen ΔT_x der Temperatur der Rohranlegethermometer von der Prüfstreckentemperatur gemessen. Weiterhin erfolgten Messungen im Solltemperaturbereich von 100 °C bis 150 °C ohne erzwungene Konvektion an der gebeizten Prüfstrecke. Dabei wurden die Rohranlegethermometer, wie aus Abb. 6.8 ersichtlich, seitlich montiert. Im unmittelbaren Anschluss und ohne Demontage der Rohranlegethermometer erfolgte die Ermittlung der Messabweichungen ΔT_x bei identischen Solltemperaturstufen mit jeweils 20 %, 50 %, 65 % und 100 % der maximalen Lüfterleistung (siehe Tab. A11 – Tab. A14).

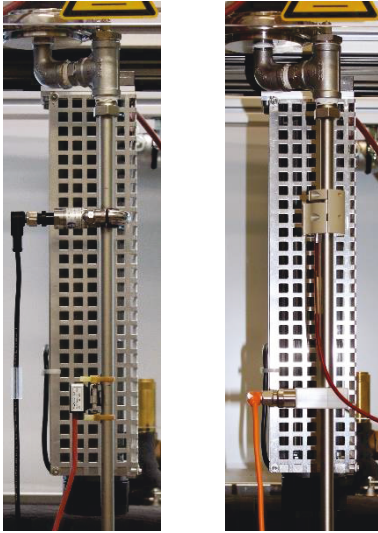


Abb. 6.8: Verwendete 2 Messaufbauten an der geheizten Prüfstrecke zur Ermittlung des Einflusses von erzwungener Konvektion

Abb. 6.9 stellt die aufgenommenen Messabweichungen in Abhängigkeit von der im Vorfeld ermittelten Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ (s. Tab. 4.5) dar. Bei allen Thermometern zeigt sich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit eine Erhöhung des Betrags der Messabweichung $|\Delta T_x|$. Zudem ist auch der Einfluss der Mediums- bzw. Solltemperatur deutlich sichtbar. Bei gleichbleibender Strömungsgeschwindigkeit folgt mit steigender Solltemperatur auch eine dem Betrag nach größere Messabweichung. Der geringste Betrag der Messabweichung in Abhängigkeit von einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit sowie Mediumstemperatur kann mittels B1 erzielt werden. Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Thermometern zeigt sich bei D1 ab ca. 5 m/s keine Veränderung der Messabweichungen mehr.

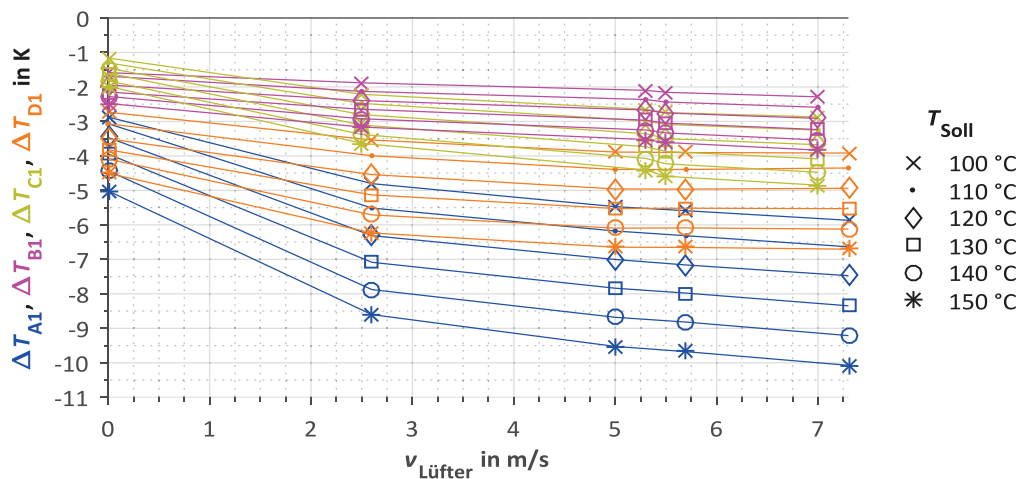


Abb. 6.9: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am geheizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei Betrachtung der relativen Messabweichung $\Delta T_{\%x}$, welche als prozentuale Abweichung von der ursprünglichen Messabweichung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von Null ($\Delta T_x(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}}) \triangleq 100 \%$) definiert sei. Wie aus Abb. 6.10 ersichtlich, folgt für C1 die größte prozentuale Empfindlichkeit $\Delta T_{\%C1}/v_{\text{Lüfter}}$ auf Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit über den Gesamtbereich. Eine Ursache hierfür kann in der im Vergleich zu den anderen Rohranlegethermometern ungeschützteren Bauform (freiliegende Anklemmung des Temperaturfühlers an das Rohr) liegen.

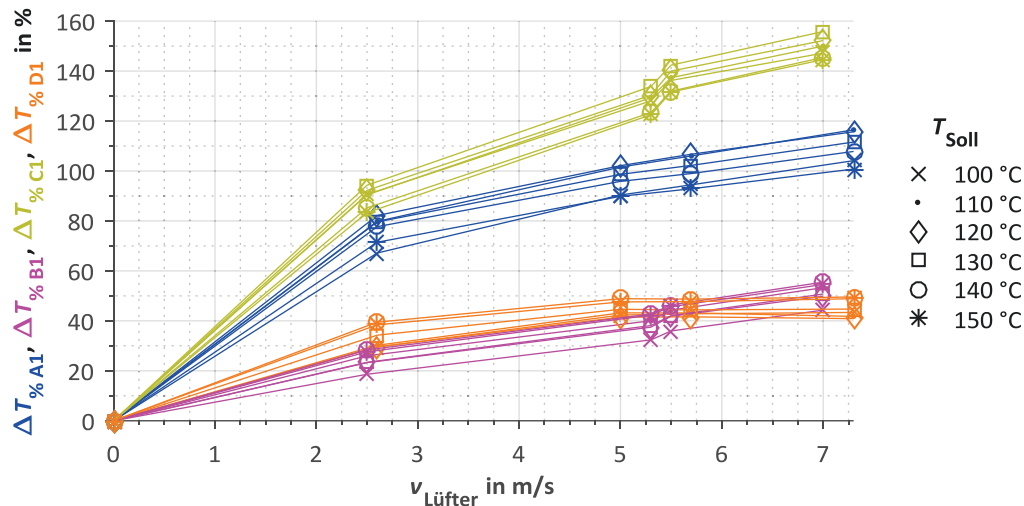


Abb. 6.10: Prozentuale Messabweichung $\Delta T_{\% x}$ von der Prüfstreckentemperatur bezogen auf $\Delta T_x(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}})$ am gebeizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit

C1 und D1 weisen im Gegensatz zu B1 und D1, insbesondere bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten, deutlich höhere prozentuale Abweichungen $\Delta T_{\% x}$ auf. Für B1 und D1 können die besten Ergebnisse erzielt werden, wenngleich ihre mit erzwungener Konvektion gemessenen prozentualen Abweichungen min. im 2-stelligen Prozentbereich liegen (z. B.: $\Delta T_{\% B1}(v_{\text{Lüfter}} = 2,5 \text{ m/s}) = 18,6 \%$).

Die ermittelten großen prozentualen Abweichungen sind zum einen auf mit der Strömungsgeschwindigkeit größer werdende Wärmeströme zwischen Rohranlegethermometer und Umgebung zurückzuführen. Zum anderen kann sich auch der Wärmeübergang zwischen den, an das Rohranlegethermometer angrenzenden, Rohrstücken gegenüber der Umgebung erhöhen. Dadurch bedingt kommt es zu einem zusätzlichen Wärmeabtransport von der Messstelle des Temperaturfühlers entlang der Rohrwand. Dies trifft selbst dann zu, wenn die Befestigung des Rohrthermometers seinen Temperaturfühler gut thermisch (isoliert) vor äußeren Einflüssen schützt. Schlussfolgernd sinkt die Rohraußenwandtemperatur an der Messstelle des Rohranlegethermometers und die aufgeführten Messabweichungen können entstehen.

In der zusammenfassenden Betrachtung ist allen Rohranlegethermometern gemein, dass es bereits bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten in ihrer Umgebung zu einem signifikanten Einfluss auf die Messabweichung kommen kann. Dieser Einfluss ist im praktischen Einsatz nicht zu unterschätzen und in keinem Fall vernachlässigbar.

6.6 Einfluss von Isolierung

Nachdem in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt wurde, wie sich die Rohranlegethermometer unter verschiedenen Mediumstemperaturen im Rohr sowie erzwungener Konvektion verhalten, soll nunmehr die Verbesserung der erzielbaren Messabweichungen durch thermische Isolierung im Vordergrund stehen. Hierzu werden im Folgenden verschiedene praxisnahe Szenarien näher untersucht. Ausgangsmaterial für alle Messungen ist dabei ein hochtemperaturstabiler EPDM-Dämmstoff mit einer Stärke von 19 mm und einer Wärmeleitfähigkeit λ_{Iso} von $\leq 0,038 \text{ W/(m K)}$ bei 0 °C [76]. Zur Fixierung dieser Isolierung wurde eine selbstklebende Aluminiumkaschierung verwendet.

Zunächst erfolgte, entsprechend Abb. 6.11 links, nur eine Isolierung der angrenzenden Rohrstücke der Rohranlegethermometer A1, B1 und C1. Dadurch wird der von den Messstellen der Rohranlegethermometer entlang der Rohrwand wegführende Wärmestrom u. U. reduziert, da der Wärmeübergang zwischen freiem Rohrstück und Umgebung mittels der Isolierung wirksam reduziert wird. Neben diesem Sachverhalt folgt auch eine Beeinflussung der freien Konvektion im Bereich der angebrachten Rohranlegethermometer, insbesondere in axialer Rohrrichtung, was zu einem geringeren Wärmeabtransport zwischen Rohranlegethermometer und Umgebung führen kann.

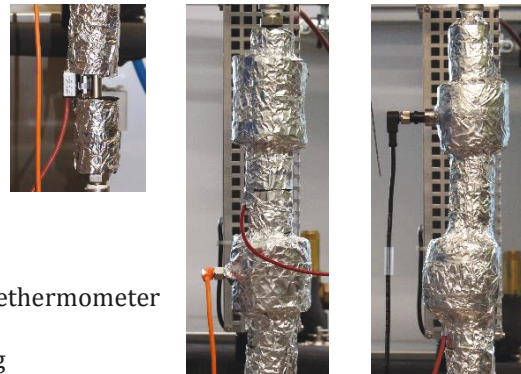


Abb. 6.11: Beispielhafte Anordnung der Rohranlegethermometer an der geheizten Prüfstrecke mit v. l. n. r. teilweiser sowie vollständiger Isolierung

In Tab. 6.5 sind die aufgenommenen Messabweichungen ΔT_x mit teilweiser Isolierung denen ohne Isolierung (vgl. Tab. A11 – Tab. A13, Lüfterleistung: 0 %) gegenübergestellt. Eine deutliche Reduzierung des Betrags der Messabweichung $|\Delta T_x|$ zeigt sich dabei nur bei Thermometer A1.

Tab. 6.5: Vergleich der Messabweichungen der Temperaturmessung von A1, B1 und C1 ohne sowie mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke in Abhängigkeit von der Solltemperatur

Thermometer	A1		B1		C1	
Isolierung	ohne	Rohrstücke	ohne	Rohrstücke	ohne	Rohrstücke
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{A1 - \text{Prüf 2}}$ in K		$\Delta T_{B1 - \text{Prüf 2}}$ in K		$\Delta T_{C1 - \text{Prüf 2}}$ in K	
100	-2,874	-2,187	-1,409	-1,338	-1,090	-1,109
110	-3,065	-2,539	-1,650	-1,530	-1,266	-1,278
120	-3,465	-2,975	-1,780	-1,760	-1,388	-1,474
130	-3,945	-3,414	-2,089	-1,999	-1,658	-1,756
140	-4,432	-3,868	-2,249	-2,222	-1,831	-1,955
150	-5,017	-4,330	-2,430	-2,447	-1,967	-2,177

Die Messergebnisse der Thermometer B1 und C1 liegen hingegen in ähnlicher Größenordnung und bewegen sich dabei im Bereich ihrer Reproduzierbarkeitsstreuung durch die (De-) Montage. Der Einfluss einer Isolierung von angrenzenden Rohrstücken der Rohranlegethermometer auf deren Messabweichungen ist somit grundsätzlich eher schwierig zu beurteilen. Tendenziell ist aber davon auszugehen, dass A1, auch durch seine Bauform, mittels Isolierung thermisch besser von seiner Umgebung entkoppelt wird.

Um nunmehr zu ergründen, wie sich die Rohranlegethermometer auf eine erzwungene Konvektion mit Isolierung der Rohrstücke verhalten, wurde, in Analogie zum vorherigen Kapitel, wieder der Lüfter des Prüfstandes genutzt. Da nur 2 Rohranlegethermometer gleichzeitig im Strömungsbereich des Lüfters platziert werden können, wurden nur die Thermometer A1 und B1 näher untersucht.

Mit Hilfe der in Tab. A16 und Tab. A17 dargelegten Messergebnisse kann die Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur über der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ grafisch aufgetragen werden, siehe Abb. 6.12.

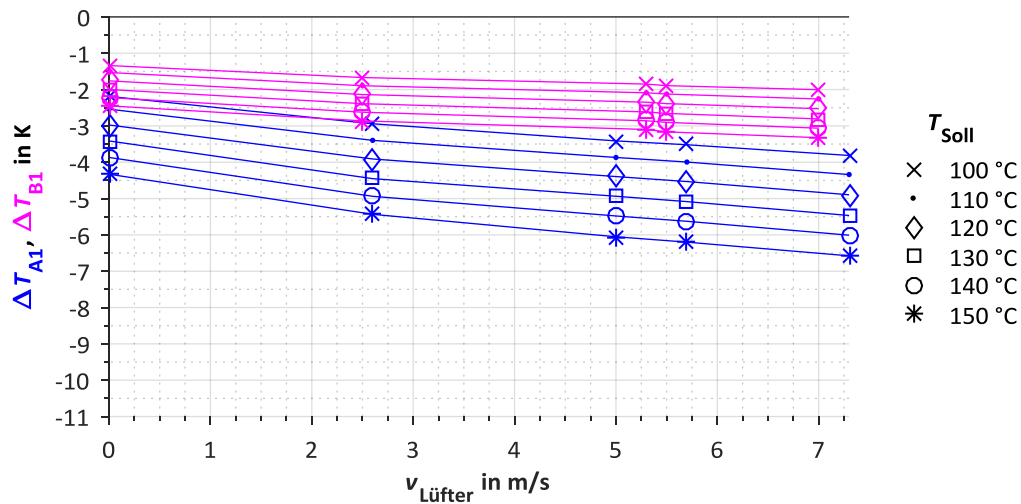


Abb. 6.12: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke in Abhängigkeit von Solltemperatur des Mediums und Strömungsgeschwindigkeit

Im Vergleich mit den ermittelten Messabweichungen ohne Isolation (s. Abb. 6.9 bzw. Tab. A11 und Tab. A12) fällt auf, dass sich für B1 nur eine geringe Verbesserung der Messabweichungen (z. B.: 507 mK bei $T_{\text{Soll}} = 150\text{ °C}$ und $v_{\text{Lüfter}} = 7,1\text{ m/s}$) ergibt. Im Gegensatz dazu folgt für A1 eine deutliche Reduzierung der Messabweichungen und eine insgesamt geringere Empfindlichkeit der Messabweichungen auf Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit.

Durch die in Abb. 6.13 dargestellte, prozentuale Messabweichung $\Delta T_{\%x}$ der Thermometer von der Prüfstreckentemperatur mit dem jeweiligen Bezug auf die Messabweichung ohne Isolierung und freier Konvektion ($\Delta T_x(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}}) \triangleq 100\%$, s. auch Tab. A11 sowie Tab. A12) werden vorgenannte Sachverhalte deutlicher sichtbar.

Es ist erkennbar, dass sich die prozentualen Messabweichungen von B1 ähnlich auf eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit verhalten, als dies bei den Messungen ohne teilweise Isolierung (vgl. Abb. 6.10) der Fall war. Eine Reduzierung der prozentualen Messabweichungen durch die Isolierung der Rohrstücke um die Messstelle von B1 erfolgt somit nicht. Für A1 ist hingegen eine deutliche Verminderung der Abhängigkeit durch eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit auf die prozentualen Messabweichungen erkennbar.

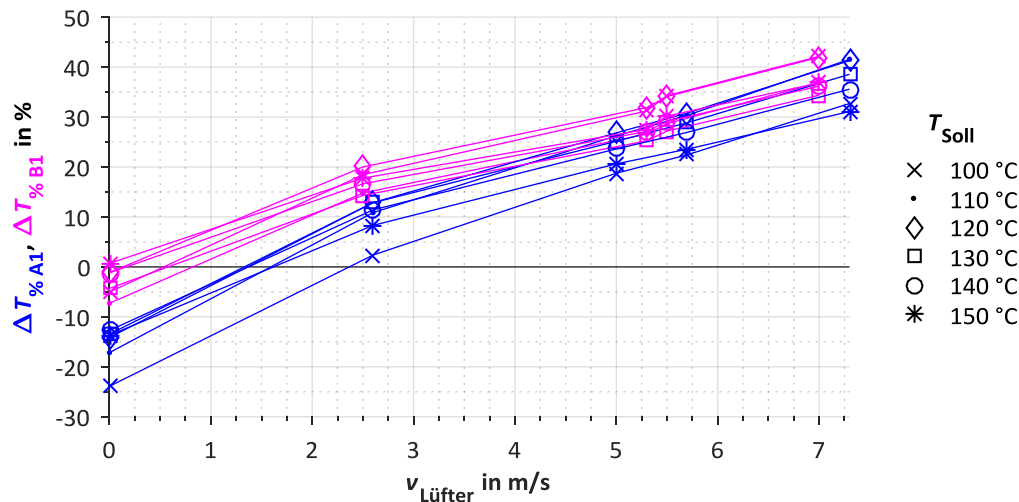


Abb. 6.13: Prozentuale Messabweichung $\Delta T_{\% x}$ von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke bezogen auf $\Delta T_x(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}})$ am gebeizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von Solltemperatur des Mediums und Strömungsgeschwindigkeit

Aufgrund der hohen Wärmeverluste zwischen Verrohrung und Umgebung sowie den damit einhergehenden höheren Energiekosten wird in der Praxis häufig eine Isolierung verwendet. Dabei wird i. d. R. versucht eine optimale Isolierung unter Einbeziehung aller in und an der Verrohrung befindlichen Bauteile (z. B. Armaturen) zu erstellen, um mögliche Wärmebrücken zu vermeiden. Aus Sichtweise der Rohranlegethermometer ist es sinnvoll diese, ebenso wie die Verrohrung, möglichst vollständig zur Umgebung hin zu isolieren. Dazu wurden, wie aus Abb. 6.11 mittig und rechts hervorgeht, die Bereiche der Rohranlegethermometer überlappend mit dem identischen EPDM-Dämmstoff versehen. Um eine mögliche Konvektion durch Luftspalte im Bereich der Überlappung zu vermeiden, wurde die gesamte Isolierung zusätzlich mit einer selbstklebenden Aluminiumkaschierung versehen.

Mittels Abb. 6.14 kann ein Vergleich der Messabweichungen $|T_x - T_{\text{Prüf}}|$ der Rohranlegethermometer zwischen keiner, teilweiser sowie vollständiger Isolierung bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen $|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|$ zwischen Umgebung und Medium gezogen werden.

Bei Thermometer A1 zeigt sich bereits durch Isolierung der angrenzenden Rohrstücke eine deutliche Reduzierung der Messabweichungen. Eine Ursache hierfür stellt ein verminderter Wärmetransport zwischen dem Halbschalensystem des Rohranlegethermometers und der Umgebung in axialer Rohrriechtung dar. Dies geht einher mit einer z. T. unterbundenen freien Konvektion zwischen Bauteiloberfläche des Rohranlegethermometers und Umgebung durch die eng anliegende Isolierung (s. Abb. 6.11 links).

Bei Thermometer B1 kann hingegen kein signifikanter Einfluss durch teilweise Isolierung festgestellt werden. Dies ist ein Indiz dafür, dass der von der Rohrwand weiterführende Wärmestrom hin zur Umgebung vorzugsweise durch den gut wärmeleitenden Temperaturfühler erfolgt, welcher nicht in die teilweise Isolierung eingebunden war.

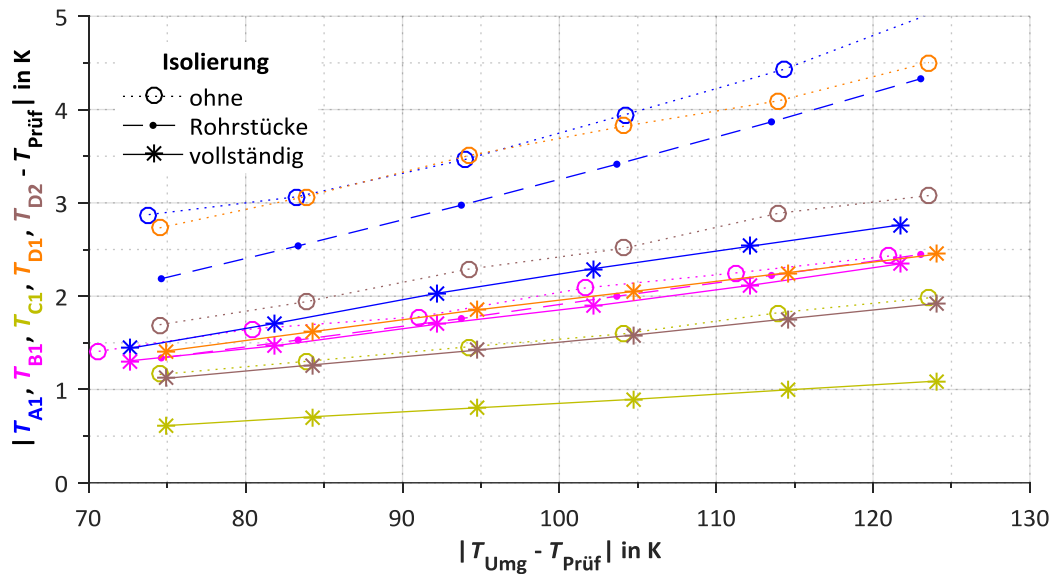


Abb. 6.14: Thermische Kopplung bei den Thermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am gebeizten Prüf-streckenrohr ohne sowie mit teilweiser (nur angrenzende Rohrstücke) und vollständiger Isolierung

Für alle Thermometer, mit Ausnahme von B1, folgt mittels vollständiger Isolierung eine signifikante Reduzierung des Betrags der Messabweichungen (vgl. Tab. A15). Dabei halbiert sich bei A1 und D1 nahezu der Betrag der Messabweichungen. Prozentual ausgedrückt ergibt sich für A1 mit vollständiger Isolierung ein Wert im Bereich von 50 % bis 59 % der ursprünglichen Messabweichung ohne Isolierung ($\triangleq 100$ %). Ein ähnliches Verhalten folgt für D1 mit Werten von 52 % bis 55 %. Ebenfalls eine deutliche Reduzierung ist auch bei C1 zu verzeichnen (62 % ... 67 %). Bei B1 liegen die Unterschiede hingegen im Rahmen der Reproduzierbarkeitsstreuung durch (De-) Montage (89 % ... 97 %), evtl. erfolgt bei diesem ein größerer Wärmetransport ausgehend vom Temperaturfühler über das Befestigungssystem hin zur Umgebung als bei den anderen Thermometern.

Die prozentuale Reduzierung der Messabweichung bei vollständiger Isolierung gegenüber der Messabweichung bei unisolierter Anordnung ist dabei nur geringfügig abhängig von der Temperaturdifferenz $|T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}}|$ zwischen Umgebung und Medium.

Aus den Messungen (vgl. Tab. A18 – Tab. A20) mit zusätzlicher erzwungener Konvektion durch den Lüfter des Prüfstandes und vollständiger Isolierung können die Messabweichungen ΔT_x der Temperatur der Rohranlegethermometer von der Prüfstreckentemperatur über der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ dargestellt werden, siehe Abb. 6.15.

Für alle Rohranlegethermometer zeigt sich dabei, im Gegensatz zu den Messungen ohne Isolierung (vgl. Abb. 6.9 bzw. Tab. A11 – Tab. A14), ein ähnlicher Verlauf $\Delta T_x/v_{\text{Lüfter}}$ der Messabweichungen zur Strömungsgeschwindigkeit. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass durch die Geometrie (z. B. Bauteiloberfläche, -anordnung) und die thermophysikalischen Bauteileigenschaften der Rohranlegethermometer bei erzwungener Konvektion ohne Isolierung unterschiedliche Wärmeübergangsbedingungen zwischen Rohranlegethermometer und Umgebung zu erwarten sind. Dies kann wiederum zu unterschiedlichen Empfindlichkeiten $\Delta T_x/v_{\text{Lüfter}}$ der untersuchten Rohranlegethermometer führen. Mittels vollständiger Isolierung wird der Wärmeabtransport zwischen Rohranlegethermometer und Umgebung i. d. R. deutlich reduziert. Die sich in diesem Fall ergebende annähernd gleiche Empfindlichkeit

$\Delta T_x/v_{\text{Lüfter}}$ aller Rohranlegethermometer bei einer erzwungenen Konvektion kann im Wesentlichen durch ähnliche Wärmetransportvorgänge in der Isolierung sowie zwischen Isolierung und Umgebung gesehen werden.

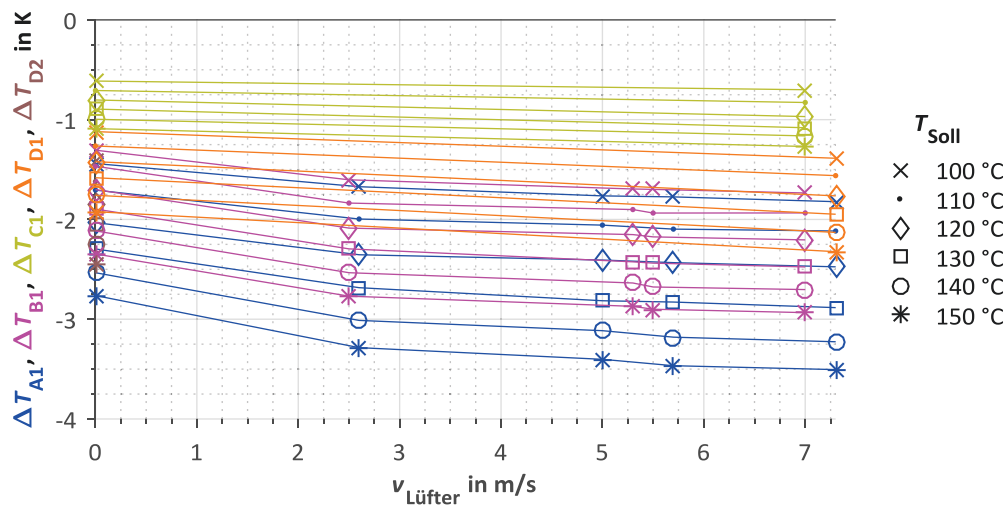


Abb. 6.15: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr mit vollständiger Isolierung in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit

Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass mit Hilfe einer Isolierung, welche nicht nur die Verrohrung, sondern auch die Rohranlegethermometer möglichst vollständig umschließt, deutliche Verbesserungen der erzielbaren Messabweichungen zwischen Mediums-temperatur und gemessener Temperatur der Rohranlegethermometer erreicht werden können. Weiterhin reduziert sich auch die Anfälligkeit der Messabweichungen auf eine äußere Konvektion bei allen Rohranlegethermometern spürbar.

6.7 Weitere Einfluss- und Störgrößen

6.7.1 Umgebungstemperaturänderungen

Im Umfeld von Rohranlegethermometern kann die Umgebungstemperatur sowie deren Änderung zu einer zusätzlichen Messabweichung führen. Prinzipiell ist dabei mit steigender Differenz zwischen der Mediums- und der Umgebungstemperatur mit einem größeren Betrag der Messabweichung für die Temperaturmessung eines Rohranlegethermometers zu rechnen (s. Kap. 2.2.8).

In der Praxis kommt es häufig zu Änderungen der Umgebungstemperatur, welche nicht selten einher gehen mit weiteren Einflussfaktoren, wie bspw. veränderter Konvektion im Umfeld des Rohres. Was im realen Anwendungsfall vielfach anzutreffen ist, lässt sich unter Laborbedingungen, wo i. d. R. vergleichsweise stabile Umgebungsbedingungen vorherrschen, nur schlecht nachbilden. Dennoch wurde der Versuch unternommen, eine Raumtemperaturänderung vorzunehmen. Hierzu wurde zunächst der Raum abgekühlt, die Rohranlegethermometer an der gebeizten Prüfstrecke befestigt und anschließend die Prüfstrecke mit einer Solltemperatur von ca. 150 °C betrieben. Abb. 6.16 stellt die Anordnung der 2 Versuchsreihen mit einem im Abstand von ca. 15 cm zum Rohr befestigten Thermometer (UR, s. Kap. 4.2.3), welches zur Messung der Umgebungstemperatur (T_{UR}) dient, dar.

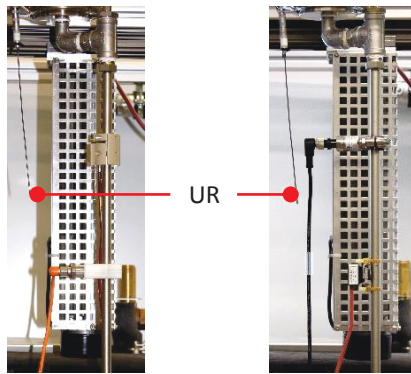


Abb. 6.16: Verwendete 2 Messaufbauten an der gebeizten Prüfstrecke zur Ermittlung der Umgebungstemperaturänderung

Nunmehr wurde die Umgebungstemperatur durch Heizen des Raumes systematisch erhöht, wobei die Zuheizung räumlich weit entfernt vom Prüfstand erfolgte, um den möglichen Einfluss einer dadurch bedingten freien Konvektion im Bereich der Prüfstrecke zu minimieren. Die über ca. 1 Stunde gemittelte Messabweichung ΔT_x der gemessenen Temperatur der Rohranlegethermometer von der Prüfstreckentemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_{UR} ist in Abb. 6.17 dargelegt. Zusätzlich ist auch die theoretisch bestimmte Messabweichung grafisch hinterlegt. Zu deren Berechnung wurde sich an dem Modell der ungestörten Rohraußenwandtemperatur nach Kap. 2.2.1 mit den hier verwendeten Parametern, wie Rohrdurchmesser, -lage, -oberfläche, freie Konvektion, Mediumtemperatur etc., jedoch ohne Wärmestrahlung orientiert.

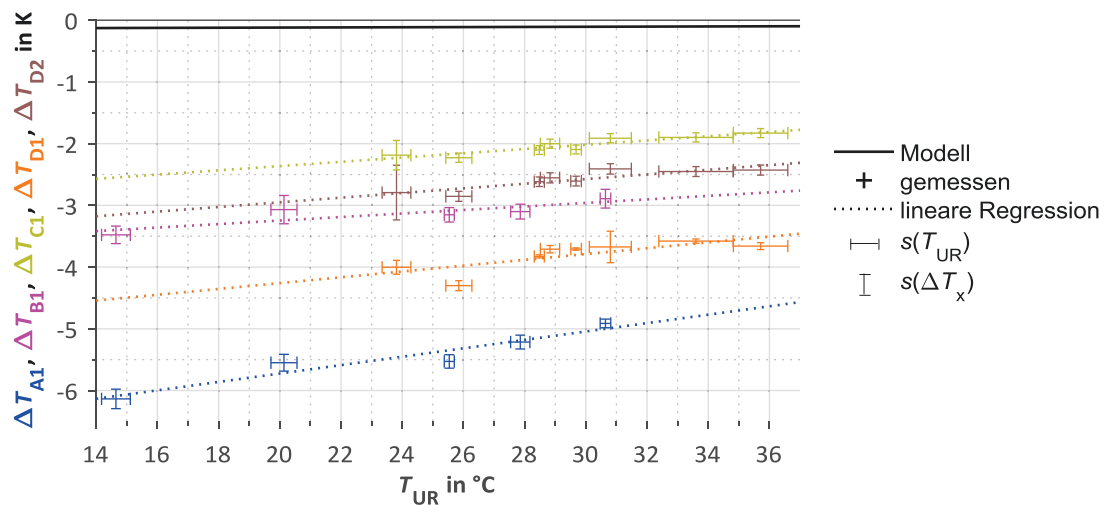


Abb. 6.17: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_{UR} mit den jeweiligen Standardabweichungen sowie Interpolation durch lineare Regression, $T_{Prüf}$ konst. ≈ 150 °C

Wenngleich die aufgenommenen Messwerte teilweise sowohl großen Streuungen der Umgebungstemperatur $s(T_{UR})$ als auch der Messabweichungen $s(\Delta T_x)$ unterworfen sind, kann mit Hilfe von linearer Regression tendenziell die Abhängigkeit der Messabweichungen ΔT_x von einer Umgebungstemperaturänderung nachgewiesen werden. Tab. 6.6 stellt hierzu die sich ergebende Empfindlichkeit der Messabweichung auf Umgebungstemperaturänderungen für die einzelnen Rohranlegethermometer vergleichend dar. Bei allen Messwerten ist zu beachten, dass Einflussfaktoren wie sich verändernde mechanische Anpressungen der Temperaturfühler an das Rohr, unterschiedliche Konvektionsbedingungen in der Umgebung, Temperaturabhängigkeiten des Messgerätes etc. das Ergebnis auch außerhalb der beschriebenen Streuungen beeinflussen können.

Tab. 6.6: Empfindlichkeit der Messabweichung ΔT_x auf Umgebungstemperaturänderungen ΔT_{UR} im Vergleich zum theoretischen Modell bei $T_{Prüf}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$

Datenquelle	Empfindlichkeit $\Delta T_x/\Delta T_{UR}$ für Rohranlegethermometer				
	A1	B1	C1	D1	D2
theoretisches Modell			0,0013		
gemessen	0,068	0,029	0,035	0,047	0,038

Es zeigt sich, dass die gemessenen Empfindlichkeiten deutlich von dem mittels theoretischem Modell bestimmten Wert von 1,3 mK/K abweichen. Letztgenannter Wert stellt jedoch den bestmöglichen Fall einer ungestörten Rohraußenwandtemperatur dar, welcher praktisch jedoch nicht ansatzweise erreicht werden kann, da es durch die Ankopplung eines Rohranlegethermometers an das Rohr zwangsläufig zu einer gestörten Rohraußenwandtemperatur kommt. Im Vergleich der Rohranlegethermometer zeigt A1 mit 68 mK/K eine deutlich höhere Empfindlichkeit als alle anderen Thermometer.

Während bei einigen Thermometern die Datenblattangabe praktisch mit nahezu gleichen Werten bestätigt werden konnte, folgte für andere eine deutlich größere Empfindlichkeit. Dies macht deutlich, dass die von den Herstellern von Rohranlegethermometern angegebenen Empfindlichkeiten bzw. Kopplungsfaktoren z. T. als ungenügend einzustufen sind. Dabei zeigt sich hier zudem der Mangel, dass in den Datenblattangaben keine Angaben zu den Messbedingungen enthalten sind, was jedoch als notwendig zu erachten ist.

Basierend auf den vorhergehenden Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass eine Umgebungstemperaturänderung im weitläufigen Umfeld eines Rohranlegethermometers dessen Messergebnis zwar beeinflusst, aber insbesondere bei kleinen Änderungen andere Einflussfaktoren entscheidender sein können. So steht bspw. bei D1 einer Umgebungstemperaturänderung von 10 K mit einer dadurch bedingten Änderung der Messabweichung um 0,470 K einer Streuung s_{D1} der Messabweichung von 0,474 K durch die Reproduzierbarkeit der Montage (s. Tab. 6.3) gegenüber. Wie in Abb. 2.13 theoretisch gezeigt wurde, kann im kritischen Umfeld eine entsprechende Isolierung die Beeinflussung durch Umgebungstemperaturänderungen auf ein Minimum reduzieren, so dass die Umgebungstemperaturänderung dann eine untergeordnete Rolle für die Messabweichungen der Rohranlegethermometer spielen kann.

6.7.2 Kontaktwiderstand

Der thermische Kontaktwiderstand zwischen Temperaturfühler und der Rohroberfläche ist, wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, hierzu zählen neben den Oberflächenrauigkeiten der beiden Kontaktflächen, Passgenauigkeit etc. insbesondere auch die sich in den Zwischenräumen der Kontaktierung ausprägenden Luftspalte. Zum (teilweisen) Verfüllen dieser Spalte kam bei den meisten Rohranlegethermometern eine identische Wärmeleitpaste zum Einsatz. Im Folgenden soll der Einfluss des Kontaktwiderstands durch verschiedene thermische Kontaktmaterialien näher untersucht werden.

Anhand der Rohranlegethermometer A1 – 3 wurde hierzu zunächst der Einfluss auf deren Messabweichungen mit Hilfe einer hochwärmeleitfähigen Folie untersucht. Während bei Wärmeleitpasten sowohl die applizierte Menge als auch deren gleichmäßige Verteilung schwierig zu handhaben sind und sich im Laufe der Zeit chemisch verändern können, bieten Wärmeleitfolien den Vorteil einer konstanten homogenen Schichtdicke. Zur Auswahl für die

folgenden Messungen kam daher die pyrolytische Graphitfolie EYGSxxxx07 der Firma Panasonic mit einer Dicke von 70 μm (siehe [139, 140]). Im Gegensatz zur, bei den vorherigen Messungen verwendeten, Wärmeleitpaste mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_k von 10 W/(m K) [130] bietet die Graphitfolie eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{k,x}$ von 15 W/(m K) durch seine Dicke sowie eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{k,y}$ von 750 – 950 W/(m K) in der dazu transversalen Ebene [140]. Um einen Vergleich zu der auch bei den anderen Rohranlegethermometern verwendeten Wärmeleitpaste zu ermöglichen, wurden zudem Messungen mit der gleichen Wärmeleitpaste vorgenommen. Weiterhin erfolgte auch eine Messung ohne thermisches Kontaktmaterial.

In Tab. 6.7 sind die Messabweichungen der gemessenen Temperatur der Rohranlegethermometer von der Mediumtemperatur ohne sowie mit Graphitfolie und Wärmeleitpaste gegenübergestellt.

Tab. 6.7: Vergleich der Messabweichungen für die Thermometer A1 – 3 am metallblanken Prüfstreckenrohr ohne sowie mit Wärmeleitpaste/-folie in Abhängigkeit von der Solltemperatur

Thermometer	A1			A2			A3		
Wärmeleitpaste/-folie	ohne	Folie	Paste	ohne	Folie	Paste	ohne	Folie	Paste
T_{Soll} in $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{A1} - \text{Prüf}$ in K			$\Delta T_{A2} - \text{Prüf}$ in K			$\Delta T_{A3} - \text{Prüf}$ in K		
100	-3,320	-1,776	-1,156	-2,997	-1,548	-1,392	-2,692	-1,767	-1,308
110	-3,696	-1,985	-1,292	-3,336	-1,861	-1,555	-3,009	-2,024	-1,486
120	-4,147	-2,286	-1,494	-3,781	-2,030	-1,761	-3,488	-2,308	-1,672
130	-4,526	-2,567	-1,905	-4,175	-2,273	-2,088	-4,003	-2,561	-1,901
140	-4,977	-2,801	-2,204	-4,550	-2,578	-2,734	-4,520	-2,869	-2,265
150	-5,236	-3,045	-2,525	-4,714	-2,842	-3,116	-4,787	-3,192	-2,516
Minimum	-5,2	-3,0	-2,5	-4,7	-2,8	-3,1	-4,8	-3,2	-2,5
Maximum	-3,3	-1,8	-1,1	-3,0	-1,5	-1,3	-2,7	-1,8	-1,3

Es zeigt sich bei Verwendung von Graphitfolie eine deutliche Verbesserung der Messabweichungen bei allen Rohranlegethermometern A1 – 3 gegenüber den Messungen ohne thermisches Kontaktmaterial. Die Messabweichungen bewegen sich dabei im Bereich von 52 % bis 67 % der ursprünglichen Messabweichungen ohne Verwendung von Wärmeleitfolie bzw. -paste ($\triangleq 100$ %). Im Vergleich zu den anderen Rohranlegethermometern ergeben sich mit Graphitfolie nunmehr Messabweichungen in ähnlicher Größenordnung wie bei Thermometer D1.

Bei Anwendung von Wärmeleitpaste kann eine weitere Reduzierung der Messabweichungen erreicht werden, wobei sich dann 35 % bis 53 % der ursprünglichen Messabweichungen ohne Verwendung von Wärmeleitpaste ergeben. Eine Ausnahme hiervon bildet nur A2 ab einer Solltemperatur von 130 $^{\circ}\text{C}$. A1 und A3 sind unter Verwendung von Wärmeleitpaste somit hinsichtlich ihrer Messabweichungen zwischen den Thermometern B1 und C1 einzugruppieren.

Es zeigt sich, dass der Einfluss des thermischen Kontaktwiderstands eine signifikante Beeinflussung der erzielbaren Messabweichungen darstellt, so dass die Anwendung von Wärmeleitpaste bzw. -folie bei den hier untersuchten Rohranlegethermometern unabdingbar ist, auch wenn es nicht explizit vom Hersteller gefordert ist.

6.7.3 Hysterese

Als Hysterese kann der Unterschied zwischen 2 gemessenen Temperaturwerten einer auf- und anschließend absteigenden Temperierung an den Stellen gleicher Referenztemperatur aufgefasst werden. Dies kann bspw. bei einem Pt100-Dünnschichtwiderstandsthermometer durch eine unterschiedliche Längenausdehnung zwischen dem Platin und dem Keramikträger und einer daraus resultierenden mechanischen Spannung verursacht werden [48].

In Analogie zur Vorgehensweise zur Bestimmung der Hysterese nach DIN EN 60751 [47] wurden die Rohranlegethermometer zunächst auf ihre kleinstzulässige Temperatur gebracht, wobei hierbei als untere Grenze nur die min. Solltemperatur von 100 °C des Prüfstandes fungieren konnte. Anschließend wurde die Solltemperatur schrittweise bis zu ihrer max. Einsatztemperatur erhöht, welche für alle Thermometer 150 °C beträgt. Nachfolgend erfolgte eine absteigende Temperierung zurück zur min. Solltemperatur. Während den Messungen wurde darauf geachtet, dass bei sowohl der auf- als auch absteigenden Temperierung die Umgebungstemperatur ungefähr gleichblieb.

Durch Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes zwischen den Messabweichungen bei aufsteigender ($\Delta T_{x \text{ auf}}$) und absteigender ($\Delta T_{x \text{ ab}}$) Temperierung nach Formel

$$\Delta T_x = \frac{\Delta T_{x \text{ ab}} - \Delta T_{x \text{ auf}}}{2} \quad (6.2)$$

folgen die in Abb. 6.18 dargestellten Verläufe. Die Messdaten hierfür wurden den Tab. A9 – Tab. A10 sowie Tab. A16 – Tab. A20 entnommen (ohne erzwungene Konvektion).

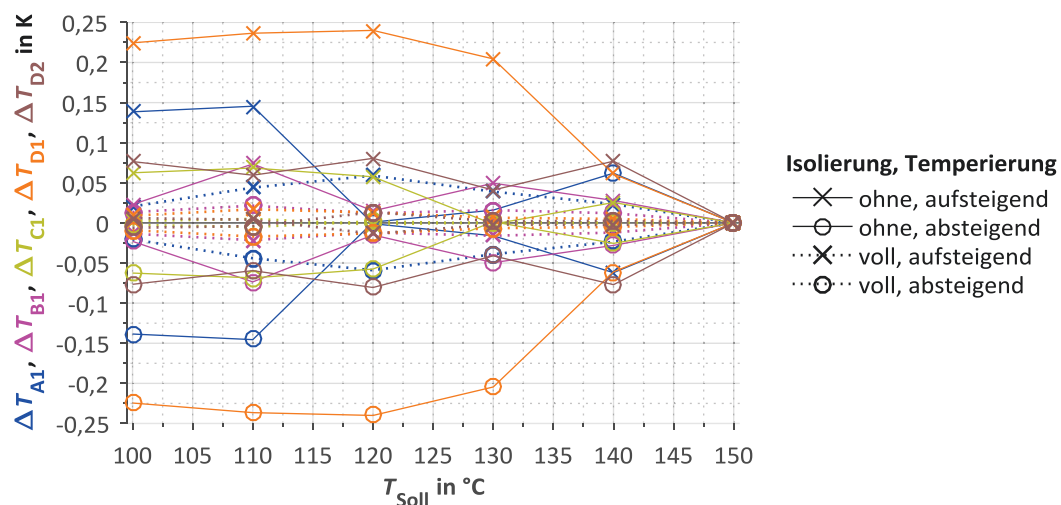


Abb. 6.18: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur als Mittelwert zwischen den Messabweichungen bei aufsteigender ($\Delta T_{x \text{ auf}}$) und absteigender ($\Delta T_{x \text{ ab}}$) Temperierung am geheizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur

Bei Betrachtung der durchgeführten Messungen ohne Isolierung des Rohres bzw. der Rohranlegethermometer fällt auf, dass D1 mit $\pm 0,24$ K die größte Differenz der Messabweichungen zwischen aufsteigender und absteigender Temperierung aufweist. Bei Widerstandsthermometern nach DIN EN 60751 [47] darf die Differenz die Grenzabweichung der Genauigkeitsklasse des jeweiligen Thermometers bei gegebener Solltemperatur nicht überschritten werden. Für die Thermometer A1, B1 und D1 – 2 mit Genauigkeitsklasse A lässt

sich die Grenzabweichung ansatzweise für die hier verwendeten Messabweichungen und Solltemperaturen nach [47]

$$\Delta T_{xG} \approx \pm(0,15 \text{ K} + 0,002 \text{ K} \cdot |T_{\text{Soll}}|) \quad (6.3)$$

bestimmen. Bspw. beträgt sie $\pm 0,35 \text{ K}$ bei einer Solltemperatur von $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Für Thermometer mit Genauigkeitsklasse 1/3 B folgt [47]:

$$\Delta T_{xG} \approx \pm(0,1 \text{ K} + 0,0017 \text{ K} \cdot |T_{\text{Soll}}|) \quad (6.4)$$

Diese formalen Kriterien sind für alle Rohranlegethermometer erfüllt, jedoch kann die Hysterese am vom Prüfstand nicht mehr einstellbaren Bereich unterhalb von $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durchaus größer sein.

Mit Hilfe der vollständigen Isolierung (siehe Abb. 6.11 mittig und rechts) ergibt sich für alle Rohranlegethermometer eine Reduzierung der gemessenen Differenzen unterhalb von $\pm 0,06 \text{ K}$. Letztgenannter Wert liegt jedoch im Bereich der Standardabweichungen der einzeln aufgenommen Messabweichungen. Eine Hysterese ist somit nicht mehr eindeutig nachweisbar.

Eine mögliche Ursache für die Unterschiede in der Hysterese zwischen den unisolierten und vollständig isolierten Messungen kann evtl. in den sich unterschiedlich ausprägenden mechanischen Spannungen der Bauteilmaterialien der Rohranlegethermometer liegen. Während bei den unisolierten Messungen ein deutlicher Temperaturgradient zwischen Rohraußenwand über den Temperaturfühler bzw. dem Befestigungsgehäuse des Rohranlegethermometers hin zur Umgebung ausgeprägt sein kann, reduziert sich u. U. dieser Gradient bei isolierter Ausführung. Zudem kann es bei vollständiger Isolierung zu geringeren (temperaturabhängigen) mechanischen Spannungen und Längenausdehnungen in den verschiedenen Bauteilen des Rohranlegethermometers kommen, da sich die Temperaturunterschiede in den einzelnen Bauteilen evtl. verringern.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Hysterese zwar innerhalb der, bei einer Kalibrierung geforderten, Grenzabweichungen liegt, aber dennoch im praktischen Anwendungsfall, insbesondere bei wechselnden Mediumtemperaturen, berücksichtigt werden sollte. Es wurde zudem gezeigt, dass die Hystereseeffekte signifikant durch Isolierung der Rohranlegethermometer sowie angrenzender Rohrstücke gesenkt werden können.

6.7.4 Parasitäre Thermospannungen

Parasitäre Thermospannungen führen bei Widerstandsthermometern zu einer positiv oder negativ überlagerten gemessenen Temperatur. Die Ursache liegt hierbei häufig in Inhomogenitäten sowie Unsymmetrien der Anschlussleitungen bzw. in deren Übergängen [102]. Dies betrifft insbesondere den Materialübergang der elektrischen Anschlussleitungen auf den Temperatursensor. Rohranlegethermometer können aufgrund des im Bereich ihres Sensors vorherrschenden großen Temperaturgradienten zwischen Mediums- und Umgebungstemperatur als besonders anfällig für parasitäre Thermospannungen angesehen werden.

Zur Untersuchung dieses Effektes wurden die Rohranlegethermometer an der gebeizten Prüfstrecke montiert und diese auf eine Solltemperatur von ca. $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einer vergleichsweise konstant gehaltenen Raumtemperatur gebracht. Nunmehr wurde zunächst wie bei

den vorherigen Messungen über einen Zeitraum von ca. 30 min die Messabweichungen der Rohranlegethermometer von der Mediumtemperatur bestimmt. Unmittelbar folgend wurden die Anschlussleitungen direkt am Memograph Messung umgepolt und wiederum die Messabweichungen bestimmt. Tab. 6.8 stellt die jeweilig gemessenen Messabweichungen sowie deren mittlere Differenz $\Delta T_{x,p}$ durch Umpolung der Anschlussleitungen dar.

Tab. 6.8: Einfluss von parasitären Thermospannungen auf die Messabweichungen der Temperaturmessung mittels Rohranlegethermometern bei $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$

Anschluss	Messabweichung $\Delta T_{x - \text{Prüf}}$ in K für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
normal	-4,866	-6,848	-9,458	-2,970	-1,808	-3,480	-2,445
umgepolt	-4,684	-6,743	-9,371	-3,085	-1,745	-2,440	-2,145
Differenz $\Delta T_{x,p}$	$\pm 0,091$	$\pm 0,053$	$\pm 0,043$	$\pm 0,057$	$\pm 0,032$	$\pm 0,516$	$\pm 0,150$
korrigierter Wert	-4,775	-6,795	-9,415	-3,027	-1,776	-2,964	-2,295
max. $s(T_x)$	0,079	0,153	0,131	0,111	0,091	0,161	0,161

Es zeigt sich bei den Thermometern A1 – 3, B1, C1 und D2 kein eindeutig nachweisbarer Effekt parasitärer Thermospannungen, da die bestimmten mittleren Differenzen $\Delta T_{x,p}$ in ähnlicher Größenordnung wie die Standardabweichungen $s(T_x)$ der Thermometer liegen. Hingegen ist bei D1 ein deutlicher Einfluss von parasitären Thermospannungen erkennbar. Eine Wiederholung der Messungen für D1 an einem anderen Messkanal des Memographs liefert dabei erneut vergleichbare Ergebnisse.

Durch Bestimmung des Mittelwertes der Messabweichung $\Delta T_{x - \text{Prüf}}$ für die beiden Anschlussvarianten kann auf den thermospannungskorrigierten Wert geschlossen werden. Es zeigt sich dabei, dass der bislang bei den Messungen beobachtete Offset zwischen den Thermometern D1 und D2 durch die Thermospannungskorrektur deutlich reduziert wird. Parasitäre Thermospannungen können damit z. T. als Ursache für Messabweichungen bei den Thermometern D1 und D2 identifiziert werden.

Zusammenfassend kann aus den Untersuchungen geschlussfolgert werden, dass parasitäre Thermospannungen die Messergebnisse der Rohranlegethermometer deutlich beeinflussen können. Prinzipiell kann dieser Einfluss zwar durch entsprechende Messgeräte mit integrierter Thermospannungskompensation direkt messtechnisch korrigiert werden, jedoch werden in der Praxis vorrangig Messgeräte eingesetzt, die nicht über eine derartige Funktionalität verfügen. Die Kenntnis und Beachtung von Thermospannungseffekten bei Rohranlegethermometern ist somit i. d. R. unabdingbar.

6.8 Messungen und Vergleich mit Wasser-Strömungskanal

6.8.1 Aufbau des verwendeten Wasser-Strömungskanals

Alle vorhergehenden Untersuchungen erfolgten ausschließlich an einem Prüfstand, welcher mit Sattedampf arbeitet. Systembedingt kann damit eine minimale Mediumtemperatur von ca. 100°C erreicht werden. Aus praktischer Sichtweise sind jedoch auch geringere Mediumtemperaturen für die untersuchten Rohranlegethermometer von Interesse. Aufgrund des sehr guten Wärmeübergangs zwischen Medium und Rohrrinnenwand empfiehlt sich die Verwendung von Wasser als Medium (s. Kap. 2.2.2) um den Mediumtemperaturbereich unterhalb von 100°C abzudecken. Im Folgenden kommt daher ein, bereits am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau vorhandener, Wasser-Strömungskanal

zum Einsatz. Weiterhin besteht dadurch die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen 2 unterschiedlichen Medien sowie Prüfstandsaufbauten.

In Abb. 6.19 sind der Aufbau sowie die wesentlichen Komponenten des verwendeten Wasser-Strömungskanals dargestellt.

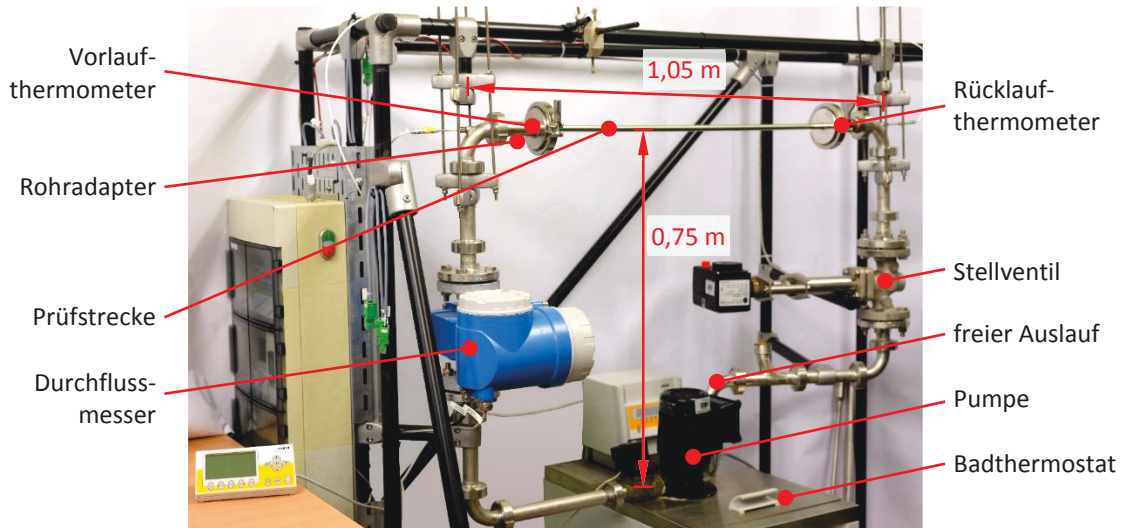


Abb. 6.19: Verwendeter Wasser-Strömungskanal

Nachgehend soll die Funktionsweise kurz erläutert werden. Das eingesetzte Medium Wasser wird kontinuierlich mittels eines Badthermostaten mit ca. 30 Litern Volumen auf die gewünschte Solltemperatur erwärmt, wobei Temperaturen bis zu max. 90 °C einstellbar sind. Anschließend wird durch eine unregelmäßige Pumpe das vorgewärmte Wasser angesaugt und durch die Verrohrung gepumpt. In der Verrohrung erfolgt zunächst mit Hilfe eines Durchflussmessers die Bestimmung des Ist-Volumendurchflusses, bevor das Medium durch die eigentliche Prüfstrecke strömt. Um die bereits beim Sattedampf-Prüfstand verwendeten Prüfstrecken direkt nutzen zu können, wurden hierzu 2 Rohradapter mit passendem Flanschsystem angefertigt. Unmittelbar vor und hinter dem eingesetzten Prüfstreckenrohr befinden sich zudem 2 kalibrierte Pt100-Thermometer (Vor- und Rücklaufthermometer), deren Schutzrohre längs auf der Rohrachse angeordnet sind. In Analogie zu den Prüfstreckenthermometern des Sattedampf-Prüfstandes wird damit eine Wärmeableitung an die Umgebung vermindert und eine Bestimmung der Mediumstemperatur auf der Rohrlängsachse ermöglicht. Weiterhin befindet sich im Rücklauf der Verrohrung ein elektromechanisch angetriebenes Stellventil. Mittels einer PC-Regelung und dem Istwert des Volumendurchflusses kann nunmehr der gewünschte Volumendurchfluss durch Änderung des Stellventilhubs eingeregelt werden. Unter Verwendung eines DN ½"-Prüfstreckenrohres kann hierbei ein Volumendurchfluss im Bereich von ca. 0,1 m³/h bis ca. 1,4 m³/h praktisch erzielt werden. Dies entspricht umgerechnet einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der DN ½"-Prüfstrecke von 0,4 m/s bis 5,6 m/s. Durch freien Auslauf des Wassers in den Badthermostaten wird ein mögliches Auftreten von Luftblasen in der Verrohrung wirksam vermindert.

6.8.2 Einfluss der Wasser-Strömungsgeschwindigkeit

Wie bereits theoretisch in Abb. 2.5 dargestellt wurde, ist bei liquiden Medien die Rohraußenwandtemperatur einer großen Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bzw. dem -profil unterworfen. Aus diesem Grund wurden Messungen am Wasser-Strömungskanal mit unterschiedlichen Wasser-Strömungsgeschwindigkeiten sowie Mediumssolltemperaturen unternommen. Um einen direkten Vergleich zu dem bisherig betrachteten Sattdampf-Prüfstand zu ermöglichen, kam die geheizte Prüfstrecke mit dem durchschiebbaren Thermometer (DST) zum Einsatz. Letztgenanntes wurde dabei in die mittige axiale Messposition der Prüfstrecke gebracht. Erste Messungen ergaben, dass die Vor- und Rücklaufthermometer keine erkennbare Differenz der Mediumstemperatur außerhalb ihrer Messunsicherheit aufwiesen, so dass das DST für alle Messungen der Rohranlegethermometer als Referenzthermometer dient.

Abb. 6.20 stellt den verwendeten Messaufbau mit Ankopplung von Rohranlegethermometern an das Prüfstreckenrohr exemplarisch dar. Insgesamt erfolgten 2 Messreihen mit Montage der Rohranlegethermometer A1, B1, C1, D1 und D2 an die, auch beim Sattdampf-Prüfstand verwendeten, Messpositionen des Prüfstreckenrohres.

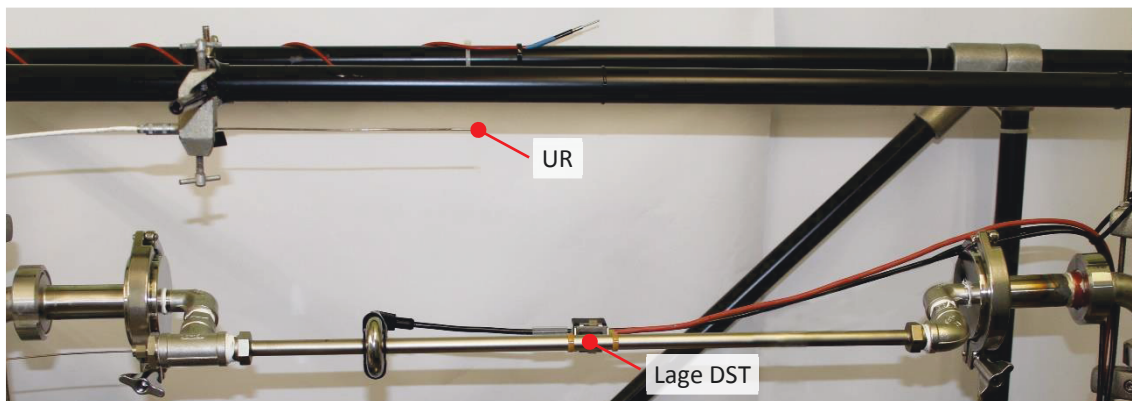


Abb. 6.20: Messaufbau am Wasser-Strömungskanal mit Rohranlegethermometern, Umgebungsthermometer UR sowie Lage des durchschiebbaren Thermometers (DST) im Rohr

Zur Bestimmung der Umgebungstemperatur wurde das bereits aus den vorgehenden Messungen bekannte kalibrierte Thermometer UR genutzt welches im Abstand von ca. 15 cm zum Rohr parallel angeordnet wurde.

Die Abb. 6.21 und Abb. 6.22 stellen die, über ca. 30 min. gemittelte, Messabweichung ΔT_x zwischen den Temperaturen des Rohranlegethermometers und des durchschiebbaren Thermometers in Abhängigkeit von der Mediumssolltemperatur sowie der berechneten Strömungsgeschwindigkeit anschaulich dar. Weiterhin ist auch die theoretisch bestimmte Messabweichung bei Mediumssolltemperaturen von 40 °C und 90 °C grafisch hinterlegt. Zu deren Berechnung wurde sich an dem Modell der ungestörten Rohraußenwandtemperatur nach Kap. 2.2.2 mit den hier verwendeten Parametern, wie Strömungsgeschwindigkeit, Mediumstemperatur, Umgebungstemperatur (Annahme: 20 °C) etc. ohne Betrachtung von Wärmestrahlung orientiert.

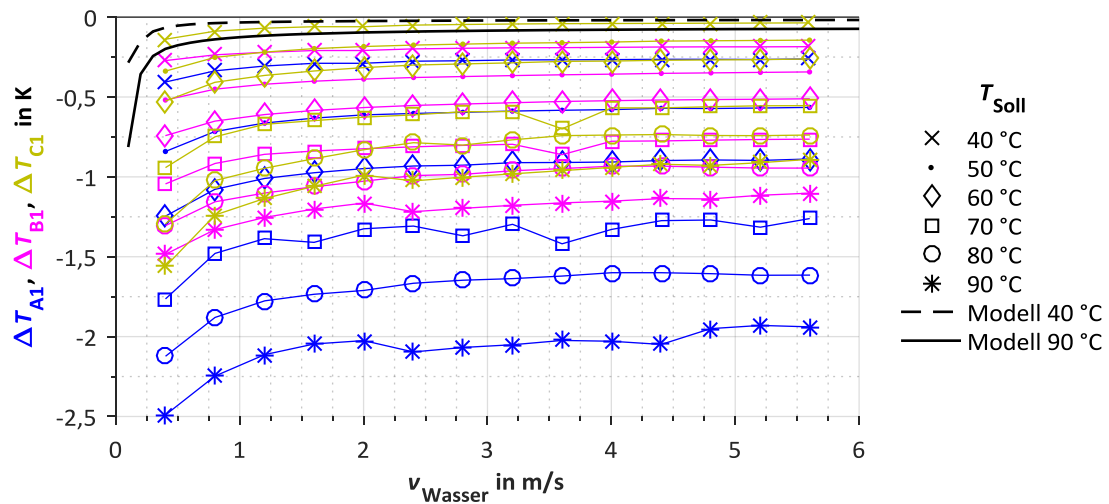


Abb. 6.21: Messabweichung ΔT_x von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern A1, B1 und C1 in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und der Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der geheizten Prüfstrecke

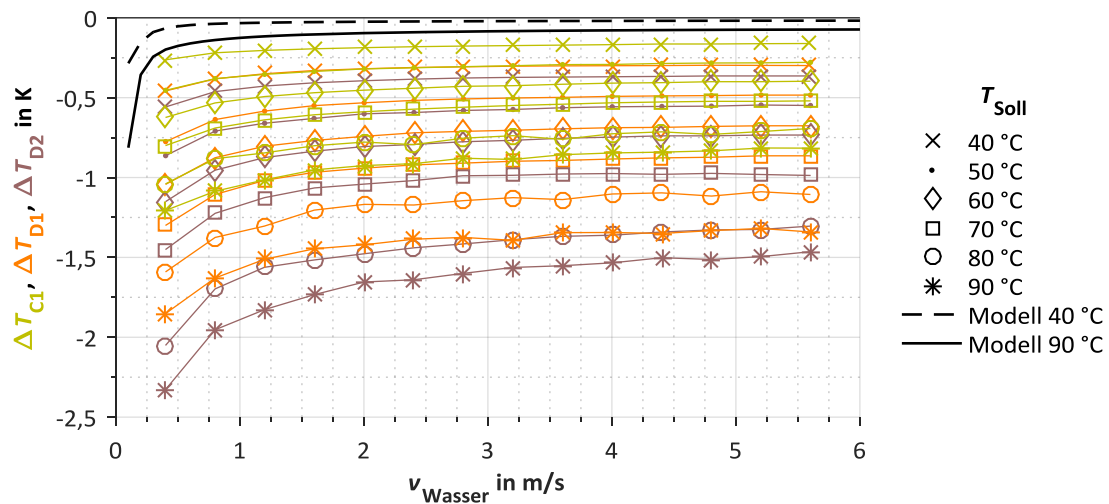


Abb. 6.22: Messabweichung ΔT_x von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern C1, D1 und D2 in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und der Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der geheizten Prüfstrecke

Die Standardabweichungen der gemessenen Temperaturmittelwerte der Rohranlegethermometer $s(T_x)$ sowie des durchschiebbaren Thermometers $s(T_{\text{DST1}})$ liegen hierbei typischerweise unterhalb von 30 mK. Die Umgebungstemperatur kann als vergleichsweise konstant angesehen werden. Sie bewegte sich bei den Messungen mit A1, B1 und C1 im Bereich von 21,6 °C bis 24,1 °C und bei C1, D1 und D2 im Intervall von 27,1 °C bis 29,6 °C. Mit einer Standardabweichung der Mittelwerte von kleiner als 0,03 m/s werden sehr geringe Streuungen der Strömungsgeschwindigkeit erzielt.

Aus den beiden vorstehenden Abb. 6.21 und Abb. 6.22 ist ersichtlich, dass die Messabweichungen aller untersuchten Rohranlegethermometer einer großen Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit unterworfen sind. Wie zu erwarten war, sinkt zudem der Betrag der Messabweichung $|\Delta T_x|$ mit fallender Mediumstemperatur.

Durch Bestimmung der Abweichung $\Delta T_{\text{Ew } x}$ vom Endwert der einzelnen aufgenommenen Messabweichungen ($\Delta T_x(v_{\text{Wasser}} = 5,6 \text{ m/s}) = 0$) wird der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums Wasser sichtbarer. Dies ist in Abb. 6.23 an den beiden gemessenen Solltemperaturgrenzen im Vergleich zum theoretischen Modell dargestellt.

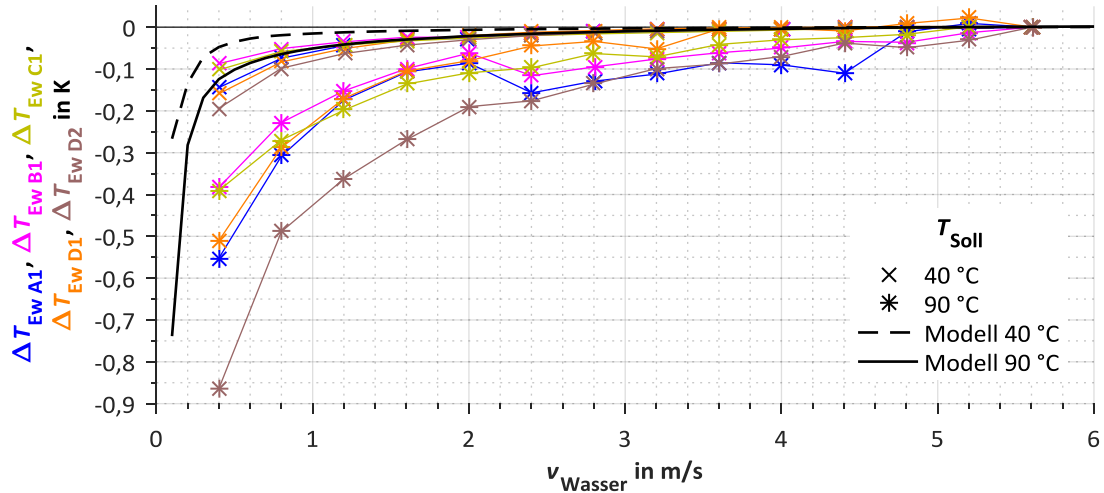


Abb. 6.23: Endwertbezogene Messabweichung $\Delta T_{\text{Ew } x}$ von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern A1, B1, C1, D1 und D2 in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der geheizten Prüfstrecke

Die theoretisch betrachtete endwertbezogene Messabweichung weist im Bereich von 5,6 m/s eine Steigung von ca. 0,5 mK pro 1 m/s bei 40 °C Mediumstemperatur und ca. 1,7 mK pro 1 m/s bei 90 °C Mediumstemperatur auf, so dass beide endwertbezogenen Messabweichungen bei dieser Strömungsgeschwindigkeit als statischer Endwert angesehen werden können. Theoretisch wirkt sich bei 40 °C Mediumstemperatur ab ca. 1,5 m/s die endwertbezogene Messabweichung dem Betrage nach nur noch unter 10 mK aus. Im praktischen Anwendungsfall zeigen alle Rohranlegethermometer ab ca. 3 m/s ein ähnliches Verhalten. In Analogie dazu erfolgt bei 90 °C Mediumstemperatur theoretisch ab ca. 3 m/s ein endwertbezogener Betrag der Messabweichung kleiner als 10 mK. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei den Rohranlegethermometern ein differenziertes Bild, während D1 ab ca. 4 m/s seinen statischen Endwert erreicht hat, kann bei A1 sowie C1 erst ab ca. 5 m/s davon ausgegangen werden. Für B1 und D2 liegt dieser oberhalb der hier gemessenen Strömungsgeschwindigkeit von 5,6 m/s. Es zeigt sich somit, dass je nach Rohranlegethermometer eine Abhängigkeit der Messabweichung von der Strömungsgeschwindigkeit selbst bei einer hohen Strömungsgeschwindigkeit sowie einem sehr guten Wärmeübergang zwischen Medium und Rohrrinnenwand beobachtet werden kann.

In Analogie zu Kap. 6.4 kann die thermische Kopplung mittels der Temperaturdifferenz des Rohranlegethermometers (T_x) von der des Mediums, gemessen mittels durchschiebbarem Thermometer (T_{DST}), in Abhängigkeit von einer Temperaturdifferenz zwischen Umgebung (T_{UR}) und Medium (T_{DST}) bestimmt werden. Abb. 6.24 stellt dies mit unterschiedlichen ausgewählten Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zum theoretischen Modell grafisch dar. Mit sinkender Wasser-Strömungsgeschwindigkeit erfolgt hierbei einerseits ein höherer Kopplungsfaktor ($|T_x - T_{\text{DST}}|/|T_{\text{UR}} - T_{\text{DST}}|$) der Messabweichung der Rohranlegethermometer in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Medium.

Andererseits wird der Kopplungsfaktor auch durch das Rohranlegethermometer selbst beeinflusst. Im Vergleich der Rohranlegethermometer untereinander zeigt sich dabei ein ähnliches Verhalten wie bereits am Sattedampf-Prüfstand (vgl. Abb. 6.7), wobei wiederum A1 die größten und C1 die niedrigsten Beträge der Messabweichungen aufweisen.

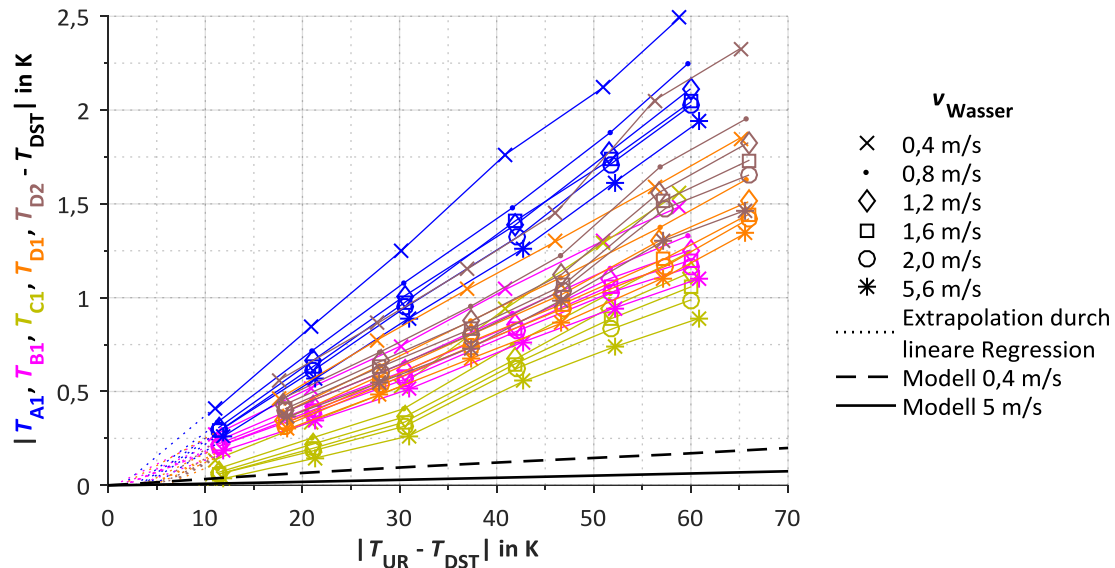


Abb. 6.24: Thermische Kopplung bei den Rohranlegethermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am Wasser-Strömungskanal mit ausgewählten Strömungsgeschwindigkeiten in der gebeizten Prüfstrecke im Vergleich zum theoretischen Modell

In der Theorie müssen sich alle aufgenommenen Messkurven am Nullpunkt der Abszisse und Ordinate schneiden, da dann keine Temperaturdifferenz mehr zwischen Medium und Umgebung auftritt. Der Wärmestrom vom Medium zur Rohraußenwand bzw. dem Rohranlegetempersensor folgt dabei zu Null. Durch Extrapolation der einzelnen Messkurven der Rohranlegethermometer kann ein Schnittpunkt mit der Abszisse typischerweise im Bereich einer Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ zwischen Umgebung und Medium von 0,5 K bis 6 K nachgewiesen werden. Hierbei gilt es zu beachten, dass sich die theoretischen Kennlinien, besonders im unteren Temperaturdifferenzbereich zwischen Umgebung und Medium, teilweise nichtlinear verhalten können (s. Kap. 2.2.8). Weiterhin wirkt sich auf den Schnittpunkt auch die Streuung der Messpunkte, eine möglicherweise abweichungsbehaftete Bestimmung der Umgebungstemperatur und die Kennlinien-Kalibrierung der Rohranlegethermometer aus. Insofern stellen die aufgenommenen Messkurven der Rohranlegethermometer plausible Messergebnisse dar.

Die Messungen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten machen deutlich, dass sich der theoretisch betrachtete Einfluss auf die Messabweichungen zwischen Rohraußenwandtemperatur bzw. Rohranlegethermometer und Mediumtemperatur in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit in der Praxis noch deutlich verstärken kann. Somit ist die Kenntnis der vorliegenden Strömungsgeschwindigkeit des Anlagenprozesses eine Voraussetzung zur Bewertung der erzielbaren Messabweichungen bei Rohranlegethermometern. Wie gezeigt wurde, können Messabweichungen ohne nennenswerte Beeinflussung von der Wasser-Strömungsgeschwindigkeit nur bei vergleichsweise großen Strömungsgeschwindigkeiten erzielt werden. Aus praktischer Sichtweise stellt sich dies als problematisch dar, da häufig im Anlagenprozess die Strömungsgeschwindigkeit unbekannt ist und

wechselnde Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können. Aufgrund des bei Wasser sehr guten Wärmeübergangs zwischen Medium und Rohrrinnenwand sind zudem mit anderen Medien u. U. noch größere Abhängigkeiten der Messabweichungen von der Strömungsgeschwindigkeit zu erwarten.

6.8.3 Vergleich mit Messungen am Sattedampf-Prüfstand

Um einen Vergleich der Messabweichungen der Rohranlegethermometer über einen weiten Mediumtemperaturbereich mit unterschiedlichen Medien (Wasser und Sattedampf) bzw. Prüfständen vornehmen zu können, wurden die beiden vorherig im Wasser-Strömungskanal verwendeten Messaufbauten am Sattedampf-Prüfstand eingefügt. Sowohl die an dem jeweiligen Prüfstreckenrohr befestigten Rohranlegethermometer als auch das durchschiebbare Thermometer (DST) blieben dabei ortsfest und wurden zwischenzeitlich nicht demontiert. Somit kann der Einfluss auf die aufzunehmenden Messabweichungen, wie sie bei einer (De-)Montage der Rohranlegethermometer auftreten können, minimiert werden. Weiterhin stand zur Bestimmung der Messabweichungen der vom Rohranlegethermometer gemessenen Temperatur das identische Referenzthermometer (DST) zur Verfügung, so dass mögliche Messabweichungen durch unterschiedliche Wahl des Referenzthermometers entfallen. Die Anordnung der beiden Messaufbauten am Sattedampf-Prüfstand erfolgte in gleicher Weise wie in Abb. 6.16 dargestellt. Anschließend wurde die Solltemperatur von ca. 100 °C bis 150 °C in 10 K-Schritten erhöht. Pro Temperierungsstufe (Messdauer: ca. 30 min) erfolgte die Bestimmung der Messabweichungen ΔT_x für die einzelnen Rohranlegethermometer. Die Messabweichungen wurden wie bei den Messungen am Wasser-Strömungskanal aus der Temperatur des Rohranlegethermometers T_x abzüglich der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers T_{DST} ermittelt. Den Tab. A21 und Tab. A22 können die detaillierten Messergebnisse entnommen werden. Die Messung der Umgebungstemperatur T_{UR} erfolgte mit Hilfe des Thermometers UR, welches ähnlich wie beim Wasser-Strömungskanal im Abstand von ca. 15 cm zum Rohr parallel angeordnet wurde. Die Umgebungstemperatur während der Messungen schwankte bei der Anordnung A1, B1 und C1 im Bereich von 29,8 °C bis 30,8 °C sowie bei der Anordnung D1, C1 und D2 im Bereich von 21,0 °C bis 21,6 °C, so dass von einer jeweils sehr stabilen Umgebungstemperatur ausgegangen werden kann.

In Abb. 6.25 ist der Vergleich der thermischen Kopplung anhand der Messabweichung $|T_x - T_{DST}|$ der Rohranlegethermometer von einer Änderung der Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ zwischen Umgebungs- und Mediumtemperatur dargestellt. Trotz verschiedener Medien (Wasser und Sattedampf), geringfügiger Umgebungstemperaturunterschiede sowie unterschiedlicher Lage des Prüfstreckenrohrs (horizontal und lotrecht) weisen die Messkurven der jeweiligen Rohranlegethermometer am Wasser-Strömungskanal und Sattedampf-Prüfstand einen ineinander übergehenden ähnlichen Verlauf auf, sofern beim Medium Wasser eine große Strömungsgeschwindigkeit (hier: 5,6 m/s) vorherrscht. Werden jedoch kleinere Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers angesetzt, so ist die Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben. In der theoretischen Betrachtung mit einer angesetzten Mediumstemperatur von 95 °C sowie einer Umgebungstemperatur von 20 °C kann dies durch einen deutlichen Unterschied des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen dem Medium und der Rohrrinnenwand begründet werden. Er beträgt 4.441 W/(m² K) bei einer Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} von 0,4 m/s im Gegensatz zu einem um den Faktor 7,5 größeren Wärmeübergangskoeffizient α_i von 33.405 W/(m² K) bei $v_{Wasser} = 5,0$ m/s. Dies

entspricht einer kalkulierten Messabweichung ΔT_{Ra} zwischen der mittleren Rohraußenwandtemperatur T_{Ra} abzüglich der Mediumtemperatur T_M (hier: 95 °C) von -213 mK ($v_{Wasser} = 0,4$ m/s) bzw. -81 mK ($v_{Wasser} = 5,0$ m/s). Mit Hilfe von dem hier verwendeten lotrecht angeordneten Prüfstreckenrohr, Satttdampf mit 100 °C und gleicher Umgebungstemperatur von 20 °C folgt für den theoretischen Wärmeübergangskoeffizienten α_i ein ebenso hoher Wert von 17.774 W/(m² K). Dabei liegt die Messabweichung bei ΔT_{Ra} mit -72 mK in ähnlicher Größenordnung wie bei Verwendung von Wasser mit $T_M = 95$ °C und $v_{Wasser} = 5,0$ m/s.

Es zeigt sich somit, dass ein vergleichsweise nahtloser Übergang von Messreihen der Rohranlegethermometer bei Verwendung der beiden Medien Wasser und Satttdampf möglich ist, was neben den theoretischen Betrachtungen auch die experimentellen Untersuchungen mit den Rohranlegethermometern darlegen. Dabei sind Messabweichungen durch das sich ändernde Medium sowie die Rohrlage im zweistelligen mK-Bereich zu erwarten. Somit ist auch ein direkter Vergleich der Rohranlegethermometer untereinander gegeben.

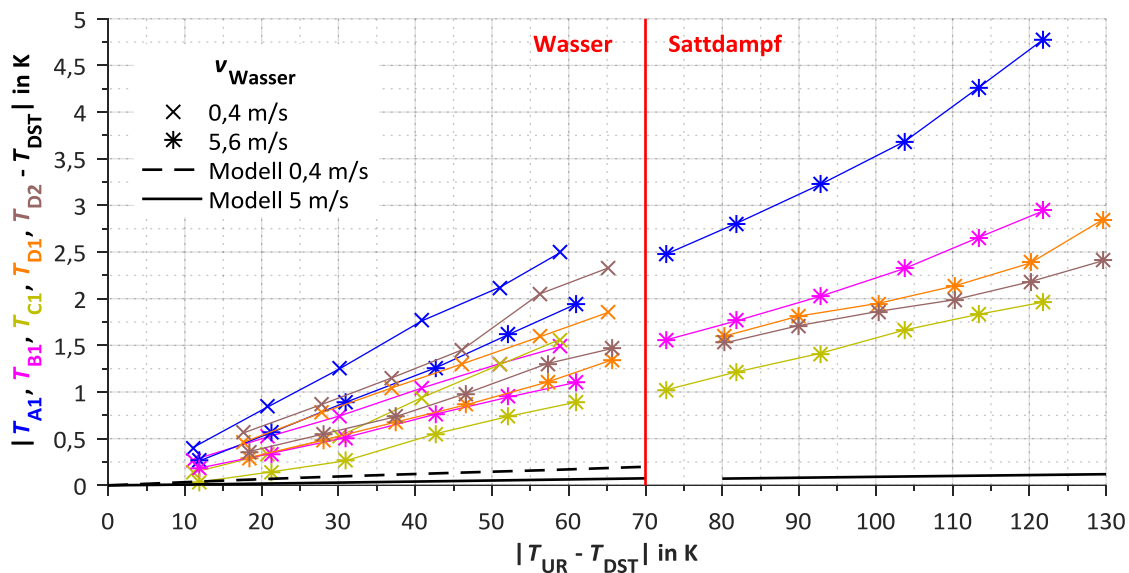


Abb. 6.25: Thermische Kopplung bei den Rohranlegethermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am Wasser-Strömungskanal mit der geheizten Prüfstrecke im Vergleich zum Satttdampf-Prüfstand sowie dem theoretischen Modell

In der Gesamtbetrachtung der thermischen Kopplung der Rohranlegethermometer zeigt sich, dass die Messabweichung $|T_x - T_{DST}|$ bei Thermometer C1 am wenigsten von einer Änderung der Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$, welche hier vorrangig durch die Änderung der Mediumtemperatur bestimmt ist, beeinflusst wird.

Tab. 6.9 stellt den Kopplungsfaktor B als Empfindlichkeit $|T_x - T_{DST}|/|T_{UR} - T_{DST}|$ der Messabweichung $|T_x - T_{DST}|$ des Rohranlegethermometers auf eine Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ vergleichend zwischen dem theoretischen Modell, den Messergebnissen beider Prüfstände und der ausschließlichen Änderung der Umgebungstemperatur (s. Kap. 6.7.1) dar. Die Ermittlung der Empfindlichkeit erfolgte dabei durch Bestimmung des Anstieges zwischen 2 benachbarten Messabweichungen. Grundsätzlich ist hierbei zu beachten, dass die Standardabweichungen der betrachteten Messabweichungen ebenso Einfluss auf die Bestimmung der Empfindlichkeit nehmen.

Tab. 6.9: Kopplungsfaktor $B (= |\Delta T_x|/|\Delta T_{UR}|)$ für die Rohranlegethermometer bei den Medien Wasser und Sattedampf im Vergleich zum theoretischen Modell

Datenquelle	Min. ... max. Kopplungsfaktor $ \Delta T_x / \Delta T_{UR} $ für Rohranlegethermometer				
	A1	B1	C1	D1	D2
Modell ($T_{UR} = 20\text{ °C}$, $v_{Wasser} = 5,6\text{ m/s}$)	0,0007 ... 0,001				
gemessen, Wasser ($v_{Wasser} = 5,6\text{ m/s}$)	0,032 ... 0,038	0,017 ... 0,021	0,012 ... 0,025	0,019 ... 0,028	0,019 ... 0,030
gemessen, Sattedampf	0,036 ... 0,061	0,022 ... 0,034	0,016 ... 0,023	0,013 ... 0,049	0,013 ... 0,024
gemessen, gesamt	0,032 ... 0,061	0,017 ... 0,034	0,012 ... 0,025	0,013 ... 0,049	0,013 ... 0,030
Zum Vergleich: $T_{UR}\text{ var.}, T_M = 150\text{ °C}$	0,068	0,029	0,035	0,047	0,038

Je nach spezifischer Bauform des Rohranlegethermometers ergeben sich Unterschiede bei ihren Kopplungsfaktoren. Im Vergleich des Kopplungsfaktors B zwischen den mit Hilfe von Wasser und Sattedampf durchgeführten Messungen der Rohranlegethermometer zeigt sich, dass teilweise zueinander ähnliche Werte des Kopplungsfaktors B erreicht werden (C1, D2). Bei den Thermometern A1, B1 und D1 nimmt dieser aber insbesondere mit einer größer werdenden Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ zu. Das Verhalten ist plausibel, da die Kopplung theoretisch ebenso nichtlinear verlaufen kann (vgl. Kap. 2.2.8). Daraus kann eine deutliche Spreizung der gemessenen Kopplungsfaktoren folgen, womit die Angabe nur eines Wertes für den Kopplungsfaktor B für einen Gesamttemperaturbereich i. A. nicht geeignet erscheint. Für ein Thermometer konnte der im Datenblatt angegebene Kopplungsfaktor praktisch über den Gesamtbereich stets unterschritten werden, wohingegen die Datenblattangabe eines anderen Thermometers bei keiner Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ eingehalten wird.

Die Änderung der Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ durch die hier vorrangige Variation der Mediumtemperatur weist tendenziell ähnliche Kopplungsfaktoren wie bei einer ausschließlichen Änderung der Umgebungstemperatur (s. Kap. 6.7.1) auf. Dies deckt sich gut mit den theoretischen Betrachtungen. Bei größeren Änderungen der Umgebungstemperatur sowie konstanter Mediumtemperatur, die in dieser Arbeit praktisch nicht realisiert werden konnten, ist jedoch ein Unterschied im Kopplungsfaktor B je nach Änderung der Mediums- oder Umgebungstemperatur bei gleicher Temperaturdifferenz $|T_{UR} - T_{DST}|$ zu erwarten.

In Bezug auf die in der VDI/VDE 3512-2 [1] aufgestellten Güteklassen (siehe Tab. 2.1) können aus Sichtweise des Kopplungsfaktors B alle Rohranlegethermometer in die Güteklasse A eingruppiert werden, da ihre Kopplungsfaktoren z. T. deutlich unter der gesetzten Grenze von 0,06 liegen. Eine Ausnahme hiervon bildet lediglich A1, welches nur geringfügig oberhalb des Grenzwertes liegt. Dies wirft die Frage auf, ob eine feinere Unterteilung der Güteklassen in der VDI/VDE 3512-2 sinnvoller zur Differenzierung der Rohranlegethermometer wäre.

6.9 Zusammenfassung

Wie gezeigt wurde, eignet sich der aufgebaute Sattedampf-Prüfstand im praktischen Anwendungsfall zur Messung und zum Vergleich von Rohranlegethermometern unter verschiedenen Einflussgrößen. Weiterhin kann, unter Berücksichtigung annähernd gleicher Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie einer hohen Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, der eingeschränkte Mediumstemperaturbereich des Sattedampf-Prüfstands mittels eines Wasser-Strömungskanal erweitert werden. Die Messbedingungen der beiden Prüfstände sind dabei als vergleichbar anzusehen, so dass reproduzierbare Messungen der Rohranlegethermometer über einen weiten Einsatztemperaturbereich ermöglicht werden.

In der Zusammenfassung der Untersuchungen mit den Rohranlegethermometern zeigt sich, dass unterschiedlichste Einflussgrößen auf die erzielbaren Messabweichungen zwischen Mediumstemperatur und Sensortemperatur der Rohranlegethermometer wirken können. Dabei folgen je nach Rohranlegethermometer unterschiedliche Messabweichungen in Abhängigkeit von ihren Einfluss- bzw. Störgrößen. Eine generelle Aussage, welches Rohranlegethermometer am besten geeignet zur Messung der Mediumstemperatur angesehen werden kann, ist i. A. nicht möglich. So weist bspw. das Thermometer C1 bei freier Konvektion in der Umgebung die niedrigsten Beträge der Messabweichungen aller Rohranlegethermometer auf (s. Abb. 6.25). Bei Betrachtung einer erzwungenen Konvektion im Umfeld reagiert C1 jedoch deutlich empfindlicher auf die Strömungsgeschwindigkeit als die anderen Thermometer (s. Abb. 6.10). Für den Anwender von Rohranlegethermometern ist somit eine genaue Kenntnis des realen Anwendungsfalls zu beachten. Hierzu zählen insbesondere die Eigenschaften des vorliegenden Mediums und Rohres, aber auch mögliche auftretende Störgrößen (z. B. Luftströmungen in der Umgebung).

Bei der Befestigung eines Rohranlegethermometers am Rohr ist zu beachten, dass ein ausreichend guter thermischer Kontakt zwischen Rohroberfläche und Temperaturfühler hergestellt wird. Der Einsatz von Wärmeleitpaste oder -folie erscheint dabei bei den gegenwärtig erhältlichen Rohranlegethermometern unausweichlich (vgl. Kap. 6.7.2). Zudem kann damit u. U. auch die Abhängigkeit der Messabweichungen von der Rohroberfläche verringert werden. Die Rohroberfläche muss prinzipiell sauber sowie ohne mechanische Verformungen und Schäden sein. Neben der Abhängigkeit der erzielbaren Messabweichungen von der Rauigkeit der Rohroberfläche ist insbesondere die Reproduzierbarkeit durch die Montage zu betrachten. Hierbei ist mit signifikanten Streuungen sowie einer weiteren Abhängigkeit von den Montagebedingungen zu rechnen (vgl. Kap. 6.3). Die Bestimmung der Reproduzierbarkeit durch die Montage gestaltet sich zudem als zeitlich umfangreich und sollte min. 10 Messungen unter gleichen Montage- und Messbedingungen umfassen. Weiterhin ist bei allen Messungen mit Streuungen der Messabweichungen selbst innerhalb einer Bauart zu rechnen (vgl. A1 – 3 in Abb. 6.2 bzw. D1 – 2 in Abb. 6.7), so dass Untersuchungen eines ausreichend großen Stichprobenumfangs bauartgleicher Rohranlegethermometer unter identischen Einsatz- und Umgebungsbedingungen zu empfehlen sind. Soll ein Rohranlegethermometer über einen weiten Einsatztemperaturbereich Verwendung finden, so ist eine Bestimmung der Messabweichung an mehreren Mediumstemperaturpunkten unausweichlich. Dies resultiert daraus, dass die Empfindlichkeit der Messabweichung der gemessenen Temperatur des Rohranlegethermometers auf eine Änderung der Temperaturdifferenz zwischen Medium und Umgebung (Kopplungsfaktor B) auch einen nichtlinearen Zusammenhang aufweisen kann (vgl. Abb. 6.25). Eine generelle Verwendung

nur eines Wertes des Kopplungsfaktors, welcher für den gesamten Einsatztemperaturbereich gelten soll, erscheint somit nicht immer sinnvoll. Wie in Kap. 6.5 gezeigt wurde, kann selbst eine erzwungene Konvektion mit kleiner Strömungsgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Messabweichung nehmen. Insofern sind mögliche Störquellen im Umfeld (z. B. Ventilatoren) zu vermeiden. Eine wirksame Methode zur Reduzierung des Einflusses von Konvektion auf das Messergebnis eines Rohranlegethermometers stellt die Anwendung einer möglichst vollständig um Rohranlegethermometer und angrenzende Rohrstücke angebrachte thermische Isolierung dar (vgl. Kap. 6.6). Neben der Reduzierung der Abhängigkeit der Messabweichung auf eine erzwungene Konvektion in der Umgebung wird durch eine thermische Isolierung auch der Einfluss der Umgebungstemperatur vermindert, so dass i. A. auch die Messabweichung der vom Rohranlegethermometer gemessenen Temperatur vermindert wird.

Anhaltspunkte für konstruktive Optimierungen von Rohranlegethermometern ergeben sich insbesondere durch reproduzierbare Montagebedingungen. Hierzu zählt die Sicherstellung einer über den gesamten Einsatztemperaturbereich des Rohranlegethermometers konstanten Anpresskraft des Temperaturfühlers an das Rohr. Damit einhergehend ist eine angepasste Wahl aller beteiligten Materialien hinsichtlich ihrer Längenausdehnung zu sehen. Während der Untersuchungen wiesen sich zudem die verwendeten Materialien der Rohranlegethermometer als teilweise problematisch aus. So waren bspw. Versprödungen, Ansätze von Rissbildungen und sich lösende Bauteile beobachtbar. Die Materialeignung ist somit innerhalb des gesamten Einsatztemperaturbereiches zu gewährleisten. Des Weiteren ist das Befestigungssystem so zu konzipieren, dass eine dauerhafte ortsfeste Montage ermöglicht wird. Hierbei kann z. B. eine einfache Befestigung mittels Kabelbindern (wie beim Rohranlegethermometer TMPT100A) im industriellen Umfeld als u. U. ungeeignet angesehen werden, da sich dabei leicht der Sensor ungünstig verschieben kann. Für die Montage ist es zudem erforderlich die Applikation an das Rohr genau zu definieren. Dies betrifft bspw. eine Angabe über die zu verwendende Wärmeleitpaste, deren Menge sowie Auftragsfläche. Hierzu sollte der Hersteller konkrete Angaben machen, um Fehler und Unklarheiten bei der Handhabung zu vermeiden. Wird die Möglichkeit einer einfachen Herausnahme des Temperaturfühlers aus dem Befestigungssystem berücksichtigt, kann eine separate Kalibrierung sowie Korrektur der Sensorkennlinie erfolgen. Zusätzlich wird dadurch eine leichte Rekalibrierungsmöglichkeit im späteren Prozesseinsatz geschaffen, ohne die Messstelle grundlegend zu verändern. Mögliche auftretende parasitäre Thermo-spannungen (vgl. Kap. 6.7.4), wie sie bspw. beim Materialübergang zwischen Sensor und Anschlussleitungen auftreten können, sollten konstruktiv vermieden werden. Um die thermische Kopplung zur Umgebung zu verringern ist eine bauteilintegrierte thermische Isolierung mit geringer Wärmeleitfähigkeit zu überdenken.

7. Empfehlungen zur Messung und Charakterisierung

Bisherige Normen und Richtlinien bieten nur wenige Anhaltspunkte zum Vergleich von Rohranlegethermometern. Wie in den vorherigen Kapiteln zudem gezeigt wurde, wirken sich in der Praxis verschiedenste Einflussgrößen auf das Messergebnis aus. Im Folgenden werden daher Empfehlungen zur Messung und Charakterisierung von Rohranlegethermometern gegeben. Diese sollen den Grundstein zur Diskussion und Ausarbeitung einer zukünftigen Richtlinie bilden.

7.1 Allgemeine Hinweise

Eine Messung von Rohranlegethermometern kann nur als Gesamtsystem bestehend aus Rohranlegethermometer sowie dessen Befestigungssystem und evtl. thermischer Kontaktmaterialien (z. B. Wärmeleitpaste/-folie) an einem genau spezifizierten Prüfstreckenrohr (z. B. Rohrgeometrie, -oberfläche, -lage) erfolgen. Eine Übertragung des mit Hilfe des Gesamtsystems ermittelten Messergebnisses auf eine selbst nur leicht geänderte Konfiguration des Gesamtsystems, wie bspw. eine andere Rohroberfläche, ist i. d. R. nicht möglich.

Für vergleichende Messungen von mehreren Rohranlegethermometern empfiehlt sich die gleichzeitige Messung an einem Prüfstreckenrohr, sofern eine gegenseitige Beeinflussung der zu messenden Thermometer ausgeschlossen werden kann.

Zielgröße für alle Messungen stellt die Mediumstemperatur auf der Rohrlängsachse bzw. die Messabweichung des Rohranlegethermometers zu dieser dar.

7.2 Herstellerangaben

Um Unklarheiten bei der Anwendung eines Rohranlegethermometers zu vermeiden sind folgende Herstellerangaben notwendig:

- Hersteller
- Typ
- Toleranzklasse nach DIN EN 60751 [47] bei Widerstandsthermometern oder DIN EN 60584 [141] bei Thermoelementen
- Einsatztemperaturbereich
- zulässige Rohr-Nennweiten nach einer standardisierten Rohrreihe
- thermische Kontaktierung (ohne oder mit Wärmeleitpaste, -folie etc.) mit genauer Bezeichnung oder Angabe des erforderlichen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ_K
- Montagehinweise (z. B. Applikation der Wärmeleitpaste, Anzugsmoment der Befestigungsschrauben, Montagetemperatur)
- zulässige Rohrlagen
- Montageposition am Rohr
- optional Abstandseinschränkungen zu Rohrbögen oder Wärmequellen

7.3 Kenngrößen

Folgende Kenngrößen sind zur Charakterisierung eines Rohranlegethermometers zu empfehlen:

- Toleranzklasse
- Messabweichungen von der Mediumstemperatur
- Kopplungsfaktoren
- Reproduzierbarkeit durch Montage

7.4 Empfohlene Messbedingungen und -einrichtungen

Da die Messbedingungen untrennbar von den zu ermittelnden Kenngrößen sind, müssen die Messbedingungen anhand nachfolgender Beschreibungen sowie Herstellerangaben definiert, angewandt und dokumentiert werden.

Unabhängig von der konkreten Messeinrichtung ist allgemein zu beachten bzw. zu empfehlen:

- konstante Raumtemperatur (z. B.: $21\text{ °C} \pm 2\text{ K}$)
- kein direkter Einfluss von erzwungener Konvektion durch bspw. Klimaanlage, Lüfter und Personenbewegungen im Bereich der Prüfstrecken
- Sicherstellung eines möglichst homogenen Temperaturfelds in der Umgebung der Prüfstrecke
- Einsatz eines oder mehrerer rückführbar kalibrierten Thermometer zur Messung der Mediumstemperatur auf der Rohrachse sowie der Umgebungstemperatur
- Bestimmung der Mediumstemperatur und deren Messunsicherheit im Bereich der Messpositionen der Rohranlegethermometer am Rohr
- Bestimmung der Umgebungstemperatur und ihrer Messunsicherheit im Bereich der Messpositionen der Rohranlegethermometer am Rohr mit einem gewählten Abstand zwischen Umgebungstemperaturfühler und Rohraußenwand, bei dem kein signifikanter Temperaturgradient der Umgebungstemperatur zu erwarten ist
- Sicherstellung einer stabilen Mediumstemperatur während der Messwertaufnahme der Rohranlegethermometer

Die Messungen sollten sich grundsätzlich nah am Anwendungsfall orientieren, so dass Parameter, wie bspw. Messmedium, Strömungsgeschwindigkeit, Rohrgeometrie etc. der geplanten Messstelle in möglichst gleicher Art und Weise mittels einer Messeinrichtung dargestellt werden. Sind einzelne Parameter nicht konkret bekannt oder sollen allgemeine Betrachtungen erfolgen, so können nachfolgende Empfehlungen einen Vergleich verschiedener Rohranlegethermometer ermöglichen. Hierbei liegt der Fokus auf einem industriellen Einsatz von Rohranlegethermometern in der Lebensmittel-, Pharma- oder Chemieindustrie. Darüber hinaus können mit den Empfehlungen Messeinrichtungen einfacher miteinander verglichen werden.

Im Temperaturbereich von ca. 30 °C bis 90 °C sollte ein Wasser-Strömungskanal mit folgenden vorzugsweisen Eigenschaften verwendet werden:

- Rohrdurchmesser: orientiert an Rohrreihen nach DIN 11866 [66], entsprechend der Vorgabe des Herstellers, bei Rohranlegethermometern mit der Möglichkeit der Verwendung an unterschiedlichen Rohraußendurchmessern sind Messungen an der, im

vom Hersteller angegebenen Durchmesserbereich liegenden, kleinst- sowie größtmöglichen Rohr-Nennweite nach DIN 11866 [66] zu empfehlen

- Rohrwanddicke: nach DIN 11866 [66] gemäß gewählten Rohrdurchmesser
- Rohrmaterial: V2A (Werkstoffnummer: 1.4435)
- Rohroberfläche: axialer Mittenrauwert Ra im Bereich von $0,2\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,5\text{ }\mu\text{m}$ (nach DIN EN ISO 4287 [115] bzw. VDI/VDE 2602 [116]), ohne Oberflächenschäden (z. B. Kratzer) an den Messpositionen der Rohranlegethermometer
- Rohrlage: lotrecht
- Rohrlänge: ca. 1 m
- Medium: Wasser
- Strömungsgeschwindigkeit: so eingestellt, dass die Abhängigkeit zwischen Messabweichung eines angeklemmten Rohranlegethermometers und Strömungsgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann
- Strömungsprofil: turbulent
- Anbringung des Rohranlegethermometers entsprechend Herstellerangaben
- Isolierung: ohne

Im Temperaturbereich ab $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann ein Sattedampf-Prüfstand mit folgenden geänderten bzw. weiteren Parametern empfohlen werden:

- Einsatz von entionisiertem oder destillierten Wasser zur Dampferzeugung
- Medium: Sattedampf
- Verwendung von ruhendem Sattedampf, daher entfällt Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeit/-profil weitgehend
- Sicherstellung eines ungehinderten Kondensatablaufs (z. B. leichtes Gefälle bei horizontaler Rohrlage)

Sollen Messungen über beide Temperaturbereiche erfolgen, so empfiehlt sich in beiden Messeinrichtungen dasselbe Prüfstreckenrohr mit angekoppelten Rohranlegethermometern sowie gleicher Rohrlage zu verwenden.

Für Temperaturmessbereiche unterhalb der Umgebungstemperatur, wie sie z. B. in der Kältetechnik vorkommen, sind weitergehende Untersuchungen von geeigneten Messeinrichtungen nötig, welche nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

7.5 Durchführung der Messungen

Zur Eingruppierung in eine entsprechende Toleranzklasse nach DIN EN 60751 [47] bzw. DIN EN 60584 [141] sollte zunächst der Fühler des Rohranlegethermometers kalibriert werden. Zur prinzipiellen Vorgehensweise sei auf die Richtlinien DKD-R 5-1 [81] bzw. DKD-R 5-3 [82] verwiesen.

Zur Bestimmung der Messabweichungen sowie Kopplungsfaktoren kann sich zur Wahl geeigneter Solltemperaturen an der DKD-R 5-6 [84] orientiert werden. Entsprechend dieser Richtlinie ist zur Approximation einer Thermometerkennlinie mit Hilfe der Callendar-van-Dusen-Gleichung (nach DIN EN 60751 [47]) eine Kalibrierung an min. 5 Stützstellen erforderlich, sofern eine Einsatztemperatur oberhalb von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrachtet wird. In Anlehnung an Vorgenanntes sollten somit min. 5 verschiedene Solltemperaturen zur Bestimmung der Messabweichungen verwendet werden. Dabei sollte die Wahl der Solltemperaturen gleichverteilt von der unteren bis zur oberen Einsatztemperatur des Rohranlegethermometers

sein. Für den hier betrachteten Fall einer gegenüber der Umgebungstemperatur größeren Mediumtemperatur empfiehlt sich eine ca. 10 K über der Umgebungstemperatur höher liegende Mediumtemperatur als untere Solltemperatur.

Für die Ermittlung der Reproduzierbarkeit durch Montage empfiehlt sich die Montage des Rohranlagethermometers unter Beachtung der Herstellerangaben, Bestimmung der Messabweichung bei der oberen Solltemperatur und anschließende Demontage (inkl. Befestigungssystem). Durch eine bspw. 10-malige Wiederholung kann dann die Standardabweichung (Streuung) anhand der einzelnen Messabweichungen als Maß für die Reproduzierbarkeit angegeben werden. Bei Rohranlagethermometern mit vom Befestigungssystem separierbaren Temperaturfühler ist eine Montage und Demontage nur des Temperaturfühlers denkbar.

Eine Wiederholung der vorgenannten Messungen zur Bestimmung der Kenngrößen sollte für eine ausreichend große Anzahl von Rohranlagethermometern gleicher Bauform erfolgen, um etwaige Exemplarstreuungen besser berücksichtigen zu können.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Zielstellung der vorliegenden Arbeit war es, Rohranlegethermometer hinsichtlich ihrer Messung der Mediumtemperatur im Inneren eines Rohres zu untersuchen und zu charakterisieren. Ausgehend von einer Recherche zu Bauformen und Eigenschaften von Rohranlegethermometern erfolgte eine Analyse bisheriger Normen und Richtlinien. Zudem wurden theoretische Betrachtungen der Wärmetransportvorgänge sowie deren Einflussgrößen vorgenommen. Mittels Literaturrecherche wurde eine geeignete Messeinrichtung ausgewählt, aufgebaut und verifiziert. Weiterhin erfolgten Messungen von Rohranlegethermometern unter verschiedenen Einflussgrößen, aus welchen Empfehlungen zur Charakterisierung hervorgehen.

Durch Recherche von Normen, Richtlinien und Datenblättern konnte zunächst festgestellt werden, dass bislang keine ausreichenden Angaben zu Kenngrößen von Rohranlegethermometern sowie deren geeignete Ermittlung vorliegen.

Die theoretischen Betrachtungen der Wärmetransportvorgänge zwischen Medium und Umgebung machten bereits deutlich, dass selbst für den vereinfachten Fall einer vom Rohranlegethermometer ungestörten Rohraußenwandtemperatur eine Vielzahl von Einflussgrößen (z. B.: Medium und dessen Strömungsgeschwindigkeit, Rohrgeometrie, freie bzw. erzwungene Konvektion in der Umgebung) die berechnete Abweichung zwischen Rohraußenwand- und Mediumtemperatur beeinflussen. Hierbei zeigte sich, dass die Einflussgrößen untereinander häufig in Wechselwirkung treten. Somit kann an Hand nur einer Einflussgröße i. A. nicht auf eine Beeinflussung der zu erwartenden Messabweichung geschlossen werden.

Bisher ist aus der Literatur kein Prüfstand zur Messung von Rohranlegethermometern bei deren typischer oberer Einsatztemperatur von 150 °C bekannt. Daher wurde ein neuer Prüfstand auf Basis von Sattedampf konzipiert, aufgebaut und erfolgreich verifiziert. Dieser besteht dabei aus mehreren austauschbaren Prüfstreckenrohren, an welche zu untersuchende Rohranlegethermometer befestigt werden können. Zudem können verschiedene Einflüsse, wie bspw. Oberflächenrauigkeit des Prüfstreckenrohres und erzwungene Konvektion in der Umgebung nachgebildet werden. Der Sattedampf-Prüfstand ermöglicht dabei eine reproduzierbare Messung im oberen Einsatztemperaturbereich von 100 °C bis 150 °C ohne Beeinflussung von Strömungsgeschwindigkeit und -profil des Mediums. Im Vergleich zu dem in [92] beschriebenen Sattedampf-Prüfstand konnte eine um Faktor 4 kleinere Standardabweichung (bei $T_{\text{Soll}} = 120$ °C) der Mediumtemperatur bei Betrachtung der Kurzzeitstabilität erreicht werden.

Durch Messunsicherheitsbetrachtungen konnte eine erweiterte Gesamtmessunsicherheit U von 0,130 K ($k = 2$) für die gemessene und korrigierte Mediumtemperatur im Inneren eines Prüfstreckenrohres des Sattedampf-Prüfstands über dessen gesamten Einsatztemperaturbereich nachgewiesen werden.

Weiterhin wurde gezeigt, dass bei ähnlichen Umgebungsbedingungen sowie einer hohen Strömungsgeschwindigkeit des Mediums auch ein Wasser-Strömungskanal zur Messung von Rohranlegethermometern verwendet werden kann. Im Vergleich zum Sattedampf-Prüfstand können mit ihm somit ähnliche Messbedingungen im Einsatztemperaturbereich von Raumtemperatur bis 90 °C realisiert werden.

Mit dem Sattedampf-Prüfstand sowie dem Wasser-Strömungskanal erfolgten Messungen mit 4 kommerziell erhältlichen Bauformen von Rohranlegethermometern.

Die Untersuchungen mit den Rohranlegethermometern zeigten, dass unterschiedlichste Einflussgrößen auf die Messabweichung zwischen Mediumstemperatur und Sensortemperatur der Rohranlegethermometer wirken können. Je nach Bauart und Anbringung der Rohranlegethermometer, aber auch der Umgebungsbedingungen konnten dabei i. d. R. unterschiedliche Empfindlichkeiten der Messabweichung auf Einfluss- bzw. Störgrößen festgestellt werden. Als wesentliche Einflussgrößen konnten die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, die Reproduzierbarkeit durch die Montage der Rohranlegethermometer, der thermische Kontaktwiderstand zwischen Rohr und Temperaturfühler sowie eine erzwungene Konvektion in der Umgebung identifiziert werden. Mittels einer thermischen Isolierung von Rohr und Rohranlegethermometer kann i. A. eine Reduzierung der Messabweichungen erfolgen. Zudem vermindert sich dabei der Einfluss von freier und erzwungener Konvektion in der Umgebung auf die Messabweichungen.

Schlussfolgernd zeigt sich, dass bei der Messung von Rohranlegethermometern eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Medium, Rohr, Thermometer, thermischen Kontaktwiderstand zwischen Rohr und Temperaturfühler sowie Umgebung, erforderlich ist.

In den Datenblättern der Hersteller von Rohranlegethermometern fehlen bislang Angaben zu Kenngrößen und unter welchen Messbedingungen diese ermittelt wurden. Mit Hilfe der durchgeführten experimentellen Untersuchungen gelang es, Empfehlungen zur geeigneten Messung und Charakterisierung von Rohranlegethermometern zu geben. Hierbei sind folgende charakterisierende Kenngrößen als wichtig zu erachten: Toleranzklasse des Sensors, Messabweichung zwischen Sensor- und Mediumstemperatur, Kopplungsfaktor (Messabweichung zur Temperaturdifferenz zwischen Medium und Umgebung) und Reproduzierbarkeit durch Montage des Rohranlegethermometers an ein Rohr. Soll ein Rohranlegethermometer über einen weiten Temperaturbereich eingesetzt werden, so ist eine Bestimmung der Messabweichung bzw. des Kopplungsfaktors i. d. R. bei mehreren Mediumstemperaturen erforderlich.

Zusammenfassend wird dem Anwender mit Hilfe dieser Arbeit die Möglichkeit gegeben, Rohranlegethermometer besser verstehen, bewerten, auswählen und anwenden zu können. Des Weiteren wurde der Grundstein für zukünftige Normen- und Richtlinienarbeiten gelegt.

Ansatzpunkte für weitergehende Untersuchungen stellen die Bestimmung der dynamischen Kennwerte von Rohranlegethermometern sowie Messungen des thermischen Kontaktwiderstands dar. Hierbei könnten gut wärmeleitfähige Kontaktmaterialien mit unterschiedlichen thermophysikalischen Stoffeigenschaften näher hinsichtlich ihrer Beeinflussung auf die Messabweichungen untersucht werden. Weiterhin wäre durch Anpassung der Komponenten des Sattedampf-Prüfstandes eine Erweiterung von dessen oberer Einsatztemperatur denkbar.

Literaturverzeichnis

- [1] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3512-2:2017 Temperaturmessung für die Gebäudeautomation - Temperaturfühler, Temperatursensoren und ihre messtechnischen Parameter*.
- [2] HONEYWELL GMBH: *Oberflächentemperaturfühler*. Gebrauchsmuster: DE 6939102 U. Anmeldedatum: 06.05.1971.
- [3] SUNVIC-REGLER GMBH: *Anlegefühler*. Gebrauchsmuster: DE 7112107 U. Anmeldedatum: 16.06.1971.
- [4] LGZ LANDIS & GEYER ZUG AG: *Anlege-Temperaturfühler*. Gebrauchsmuster: DE 7733681 U1. Anmeldedatum: 09.02.1978.
- [5] U. CLAUß: *Temperatur-Anlegesensor*. Gebrauchsmuster: DE 202012006982 U1. Anmeldedatum: 13.08.2012.
- [6] BIFFAR ENERGIESPARTECHNIK GMBH: *Temperatursensor zur Bestimmung der Temperatur eines in der Rohrleitung strömenden Mediums*. Gebrauchsmuster: DE 202013005207 U1. Anmeldedatum: 11.09.2014.
- [7] J. R. BLUNDELL; et al.: *Temperature sensor belt*. Patentanmeldung: WO 2014182526 A1. Anmelder: Illinois Tool Works Inc., Anmeldedatum: 13.11.2014.
- [8] K. IRRGANG; et al.: *Verfahren zur Temperaturmessung sowie Anlegetemperaturfühler*. Patenterteilung: DE 10227454 A1. Anmelder: Temperaturmeßtechnik Geraberg GmbH, Anmeldedatum: 22.05.2003.
- [9] A. E. C. MERLIN: *Sonde de température pour des fluides circulant en tuyauterie*. Patenterteilung: FR 2252566 B3. Anmelder: AUXITROL, Anmeldedatum: 26.12.1975
- [10] L. PALESTRI; A. SCHALLER: *Dispositi de mesure de la temperature d'un fluide dans un conduit et systeme de controle utilisant un tel dispositif*. Patenterteilung: FR 2833346 B1. Anmelder: Jules Richard Instruments SA, Anmeldedatum: 02.07.2004.
- [11] K. PHILIPPI: *Temperaturfühler als Anliegefühler vorzugsweise für Warmwasser-Zentralheizungsanlagen*. Gebrauchsmuster: DE 1979888. Anmeldedatum: 29.02.1968.
- [12] J. PROCTOR; A. HAIRREL; A. CONANT: *Line & pipe flexible temperature sensor assembly*. Patentanmeldung: WO 2014092744 A1. Anmeldedatum: 19.06.2014.
- [13] H.-J. RABE: *Temperaturanlegefühler*. Patentanmeldung: DE 3032754 A1. Anmeldedatum: 08.04.1982.
- [14] E. RADEMACHER; D. STEURER; M. GERSTENHÖFER: *Vorrichtung zur Halterung der Meßspitze eines Thermoelements an einem Bauteil*. Patentanmeldung: DE 4427182 A1. Anmelder: Siemens AG, Anmeldedatum: 08.02.1996.
- [15] A. REIFERS; J. KRAMER; A. MOSER: *Befestigungsmittel für Temperaturfühler*. Patentanmeldung: EP 0908711 A1. Anmelder: Etheco Sales and Development Corp., Anmeldedatum: 14.04.1999.
- [16] R. SAX: *Messfühler zur einfachen Befestigung an einem Rohr*. Patenterteilung: DE 4430770 B4. Anmelder: Siemens Building Technologies AG, Anmeldedatum: 03.04.2008.
- [17] P. A. STANIFORTH: *Strap-on pipe probe*. Patenterteilung: US 6834993 B1. Anmelder: Cooper Instrument Corp., Anmeldedatum: 28.12.2004.
- [18] FLUTEC FLUIDTECHNISCHE GERÄTE GMBH: *Vorrichtung zum Messen der Temperatur an einer zylindrischen Oberfläche, insbesondere am Mantel eines Rohres*. Gebrauchsmuster: DE 8310279 U1. Anmeldedatum: 06.10.1983.

- [19] GOSSEN GMBH: *Befestigungsvorrichtung für Sensoren*. Gebrauchsmuster: DE 8329408 U1. Anmeldedatum: 12.01.1984.
- [20] LABOM MEß- UND REGELTECHNIK GMBH: *Haltevorrichtung zur Aufnahme eines Mess-einsatzes zur Temperaturmessung, Messvorrichtung mit derartiger Haltevorrichtung sowie Verwendung einer derartigen Haltevorrichtung bzw. Messvorrichtung*. Gebrauchsmuster: DE 202012104736 U1. Anmeldedatum: 01.02.2013.
- [21] P. D. CONVERSE: *Non-intrusive temperature measurement assembly*. Patentanmeldung: WO 2015099933 A1. Anmelder: Rosemount Inc., Anmeldedatum: 02.07.2015.
- [22] R. H. CORNELIUS: *Pipe temperature sensing assembly*. Patentanmeldung: GB 2281123 A. Anmelder: Thermocouple Instruments Ltd., Anmeldedatum: 22.02.1995.
- [23] R. KARGER: *Temperaturmessvorrichtung*. Patenterteilung: DE 102005040699 B3. Anmelder: Labom Meß- und Regeltechnik GmbH, Anmeldedatum: 11.01.2007.
- [24] R. PÖLLATH; G. WOLF: *Temperaturmessvorrichtung zur Bestimmung der Temperatur an der Oberfläche einer Rohrleitung*. Patentanmeldung: WO 2014037257 A3. Anmelder: Endress+Hauser Wetzler GmbH + Co. KG, Anmeldedatum: 03.07.2014.
- [25] B. A. AMRINE; P. TEDERS: *Temperature probe and connector*. Patentanmeldung: US 4091672 A. Anmelder: Sarns Inc., Anmeldedatum: 30.05.1978.
- [26] W. GRUNDMANN; O. BARD: *Vorrichtung zur Befestigung eines Sensors an einem Rohr*. Patenterteilung: EP 2000787 B1. Anmelder: Epcos AG, Anmeldedatum: 11.07.2012.
- [27] B. HALTER: *Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur*. Patentanmeldung: DE 102009007948 A1. Anmeldedatum: 16.09.2010.
- [28] G. INVERNIZZI: *Temperature sensor for pipes with elastic fixing means*. Patentanmel-dung: EP 2098841 A1. Anmelder: Nordgas S.r.l., Anmeldedatum: 09.09.2009.
- [29] G. KLOIBER; H. STRALLHOFER; R. T. MAYER: *Sensor Arrangement*. Patenterteilung: US 782410 B2. Anmelder: Epcos AG, Anmeldedatum: 02.11.2010.
- [30] T. W. PARKER; C. D. GRANT: *Temperature transducer assembly*. Patentanmeldung: EP 0692704 A1. Anmelder: Ranco Inc., Anmeldedatum: 17.01.1996.
- [31] P. SCRABALAT; A. VOTA: *Sonde de contact*. Patenterteilung: FR 2842908 B1. Anmelder: C.F.C.A. Finances, Anmeldedatum: 08.07.2005.
- [32] K. WIENAND; G. HACKER; M. MUZIOL: *Vorrichtung zur Bestimmung der Temperatur eines strömenden Mediums in einer Rohr- oder Schlauchleitung*. Patenterteilung: DE 10314705 B3. Anmelder: Heraeus Sensor Technology GmbH, Anmeldedatum: 01.07.2004.
- [33] H. YUMOTO: *Sensor fixture*. Patentanmeldung: WO 2015012075 A1. Anmelder: TLV Co. Ltd., Anmeldedatum: 29.01.2015.
- [34] GEBRÜDER SULZER AG: *Temperaturmesseinrichtung mit Mantel-Thermoelement*. Gebrauchsmuster: DE 7813818 U1. Anmeldedatum: 04.10.1979.
- [35] SOCIÉTÉ CHAUVIN ARNOUX: *Temperaturfühler zum Messen von Oberflächentempera-turen*. Gebrauchsmuster: DE 8507774 U1. Anmeldedatum: 25.04.1985.
- [36] A. DECKER; et al.: *Anlegetemperaturfühlvorrichtung zum autarken Messen der Temperatur eines Behältnisses*. Patentanmeldung: DE 102014012086 A1. Anmelder: ABB Technology AG, Anmeldedatum: 14.08.2014.
- [37] G. HONIGMANN; W. MINK; A. HOMBURG: *Handgeführter Temperatur-Kontaktfühler*. Patentanmeldung: DE 2553161 A1. Anmelder: Barmag Barmer Maschinenfabrik AG, Anmeldedatum: 08.06.1977.

-
- [38] T. ISHIDA; H. ONOZAWA: *Temperature detector*. Patentanmeldung: JP 61243333 A2. Anmelder: Chino Corp., Anmeldedatum: 29.10.1985.
- [39] O. RAUDSZUS: *Haltevorrichtung für einen Temperaturfühler*. Patentanmeldung: DE 3126931 A1. Anmelder: Ultrakust Gerätebau GmbH & Co KG, Anmeldedatum: 03.02.1983.
- [40] P. REN: *Arrangement for detecting temperature variations with accommodation for the related sensor*. Patentanmeldung: WO 02058907 A1. Anmelder: S.I.P.A. S.p.A., Anmeldedatum: 01.08.2002.
- [41] J. M. SIDONI: *Return bend temperature sensor*. Patenterteilung: US 6814486 B2. Anmelder: Advanced Thermal Products Inc., Anmeldedatum: 09.11.2004.
- [42] W. S. TAYLOR: *Measuring apparatus*. Patenterteilung: US 2967429 A. Anmelder: Honeywell Regulator Company, Anmeldedatum: 10.01.1961.
- [43] M. J. PLISKA: *Fluid line temperature sensing*. Patentanmeldung: US 2013107907 A1. Anmelder: Isspro Inc., Anmeldedatum: 02.05.2013.
- [44] U. SAKOWSKY; M. MUZIOL: *Temperatur-Messvorrichtung*. Patenterteilung: DE 10029186 C2. Anmelder: Heraeus Electro-Nite International N.V., Anmeldedatum: 25.04.2002.
- [45] TEMPERATURMESSTECHNIK GERABERG GMBH: *Vorrichtung zur Bestimmung der Temperatur in Rohrleitungen*. Gebrauchsmuster: DE 29914553 U1. Anmeldedatum: 02.12.1999.
- [46] AFRISO-EURO-INDEX GMBH: *Rohrtemperatursensor RTS*. (Datenblatt) Internet: <https://www.afriso.de/servlet/com.itmr.waw.servlet.FileViewer?dokmanid=2091005&kdid=256967&sprachid=1> (Abruf: 04.12.2017).
- [47] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 60751:2009 Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatur Sensoren (IEC 60751:2008)*.
- [48] F. BERNHARD: *Handbuch der technischen Temperaturmessung*. 2. Aufl. Berlin, u. a.: Springer, 2014. ISBN: 9783642245053.
- [49] F. P. INCROPERA; et al.: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. Aufl. Hoboken: Wiley, 2007. ISBN: 9780471457282.
- [50] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI-Wärmeatlas mit 320 Tabellen*. 11. Aufl. Berlin, u. a.: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 9783642199813.
- [51] P. VON BÖCKH: *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. ISBN: 9783540314325.
- [52] W. R. BLEVIN; W. J. BROWN: *Precise Measurement of Stefan-Boltzmann Constant*. In: *Metrologia* 7, S. 15 - 19. 1971.
- [53] K. SPINDLER; A. FRANK: *Umdruck zur Vorlesung: Grundlagen der Wärmeübertragung*. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart: 2014. Internet: <http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/waermeuebertragung/umdruck.pdf> (Abruf: 26.02.2018).
- [54] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3522-1:2014 Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern - Grundlagen und Kennwerte*.
- [55] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3511-1:1996 Technische Temperaturmessungen - Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmeßverfahren*.
- [56] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3511-2:1996 Technische Temperaturmessungen - Berührungsthermometer*.
-

- [57] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3511-5:1994 Technische Temperaturmessungen - Einbau von Thermometern.*
- [58] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3512-1:2017 Temperaturmessung für die Gebäudeautomation - Grundlagen.*
- [59] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3512-4:2017 Temperaturmessung für die Gebäudeautomation - Prüfung von Temperaturfühlern.*
- [60] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3512-3:2009 Temperaturmessung für die Gebäudeautomation - Montage von Temperaturfühlern.*
- [61] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 3522-2:2014 Zeitverhalten von Berührungsthermometern - Experimentelle Bestimmung von Zeitprozentkennwerten.*
- [62] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 834:2017 Heizkostenverteiler für die Verbrauchserfassung von Raumheizflächen – Geräte mit elektrischer Energieversorgung.*
- [63] T. KÖSTER: *Temperaturmessung im regulierten Umfeld.* In: *TechnoPharm 2*, S. 131 - 136. 2012.
- [64] D. W. MARQUARDT: *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters.* In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11*, S. 431 - 441. 1963.
- [65] K. LEVENBERG: *A method for the solution of certain non-linear problems in least squares.* In: *Quarterly of Applied Mathematics 2*, S. 164 - 168. 1944.
- [66] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 11866:2008 Rohre aus nichtrostendem Stahl für Aseptik, Chemie und Pharmazie - Maße, Werkstoffe.*
- [67] PETER HUBER KÄLTEMASCHINENBAU AG: *Technisches Datenblatt SilOil M20.195/235.20.* 2011. Internet: http://www.huber-online.com/download/techsheets/Huber_M20.195-235.20_techsheets_DE.pdf (Abruf: 09.12.2017).
- [68] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT BERUFSVERBAND E.V.: *Cu-DHP* (Datenblatt) 2005. Internet: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/Datenblaetter/Kupfer/Cu-DHP.pdf (Abruf: 08.12.2017).
- [69] THYSSENKRUPP MATERIALS EUROPE GMBH: *Unlegierter warmfester Stahl TK P235GH.* (Datenblatt) 2006. Internet: <http://www.thyssenkrupp.at/files/rohre/Werkstoffdatenblaetter/P235GH.pdf> (Abruf: 13.04.2018).
- [70] HSM STAHL- UND METALLHANDEL GMBH: *Werkstoffdatenblatt 1.4301 / X5CrNi18-10.* Internet: http://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user_upload/datenblatt/HSM_Datenblatt_1.4301.pdf (Abruf: 13.04.2018).
- [71] KLEIBER INFRARED GMBH: *Emissionsgradtabelle.* Internet: <http://www.kleiberinfrared.com/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html> (Abruf: 07.01.2018).
- [72] TESTO SE & CO. KGAA: *Emissionsgradtabelle.* Internet: <https://media.testo.com/media/b5/14/6481a245e502/Emissivity-table-DE.pdf> (Abruf: 07.01.2018).
- [73] VIZAAR INDUSTRIAL IMAGING AG: *Emissionsgrad-Tabelle.* Internet: <http://www.thermografie-xtra.de/tipps-tricks/emissionsgrad-tabelle> (Abruf: 07.01.2018).
- [74] KAIMANN GMBH: *Kaifoam PE.* (Datenblatt) Internet: http://www.kaimann.com/authoring/auth/Documents/Kaifoam_PE-DE.pdf (Abruf: 02.05.2018).

-
- [75] F. OCHS; et al.: *Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen*. 14. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, 12. - 14.05.2004.
- [76] KAIMANN GMBH: *Kaiflex Solar EPDM*. (Datenblatt) Internet: http://www.kaimann.com/authoring/auth/Documents/Kaiflex_Solar_EPDM-DE.pdf (Abruf: 15.09.2015).
- [77] J. H. IV LIENHARD; J. H. V LIENHARD: *A heat transfer textbook*. 4. Aufl. Cambridge: Phlogiston Press, 2017.
- [78] F. BERNHARD; et al.: *DKD-Kalibrierung von Tastfühlern für Oberflächen-Temperaturmessungen*. In: *Temperatur '98*, S. 99 - 106. 1998.
- [79] SENSONIC APS: *SenSonic Temperature Measuring System - CLAMP-ON Temperature sensors*. (Datenblatt).
- [80] LABOM MESS- UND REGELTECHNIK GMBH: *Widerstandsthermometer Clamp-on Technik für die Rohrtemperaturmessung, Typenreihe GA261*. (Datenblatt).
- [81] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *DKD-R 5-1:2018 Kalibrierung von Widerstandsthermometern*.
- [82] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *DKD-R 5-3:2018 Kalibrierung von Thermo-elementen*.
- [83] K.-H. KLINDER: *Messunsicherheit von Kalibrierthermostaten*. In: *Temperatur '98*, S. 65 - 70. 1998.
- [84] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *DKD-R 5-6:2018 Bestimmung von Thermometerkennlinien*.
- [85] S. AUGUSTIN; H. MAMMEN: *Vorteile bei der Bestimmung dynamischer und statischer Parameter von Oberflächentasttemperaturfühlern durch die Verwendung einer mechanischen Aufsetzvorrichtung*. In: *Temperatur 2009*, S. 2227 - 2232. 2009.
- [86] E. STEPP; K.-D. SOMMER; J. HENKEL: *Surface Temperature Measurement of Work Pieces and Gauges*. In: *Temperatur 2006*, S. 161 - 170. 2006.
- [87] S. AUGUSTIN; et al.: *Prüfeinrichtung für die statischen und dynamischen thermischen Meßfehler von Oberflächen-Tast-Temperaturfühlern*. In: *Sensor '97, 8. Internationale Messe mit Kongreß für Sensoren, Meßaufnehmer und Systeme, Nürnberg*, S. 219 - 224. 1997.
- [88] J.-O. FAVREAU; E. GEORGIN; B. SAVANIER: *Good practices for the implementation of surface temperature measurements / Bonnes pratiques pour la mise en oeuvre des mesures de températures de surface*. 17. International Congress of Metrology. Paris: EDP Sciences, 21. - 24.09.2015.
- [89] EUROPEAN COLLABORATION IN MEASUREMENT STANDARDS: *EUROMET Project No. 635: Comparison of the reference surface temperature apparatus at NMIs by comparison of transfer surface temperature standards - Final Report*. 2003.
- [90] M. SCHALLES; E. MENGES; H. BRÜNDL: *Thermal errors of pipe clamp probes*. TEMPMEKO 2016 XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science. Zakopane: IMEKO, 26.06 - 01.07.2016.
- [91] M. SCHALLES: *Investigation of thermal errors of industrial pipe clamp temperature probes*. TC-Thermometry (TC-T) Annual Meeting 2016. Malta: EURAMET e.V., 23. - 26.02.2016.
-

- [92] E. ROTH; H. MAMMEN: *Entwicklung eines Prüfstandes für Oberflächen-Temperaturfühler (Rohrwand-Temperaturfühler) - Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2372.10.75*. Unveröffentlicht: Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2001.
- [93] E. ROTH; H. MAMMEN: *Prüfstand für Rohrwand-Temperaturfühler - Betriebsanleitung - Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2372.10.75*. Unveröffentlicht: Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2001.
- [94] E. ROTH; S. AUGUSTIN; H. MAMMEN: *Rohrwand-Temperaturfühler für die Sterilisationsskontrolle von Bioreaktoren - Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 372.14.750*. Unveröffentlicht: Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2001.
- [95] INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE PROPERTIES OF WATER AND STEAM: *IAPWS R7-97:2012 Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*.
- [96] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 806-1:2001 Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Allgemeines*.
- [97] WASSER- UND ABWASSER-VERBAND ILMENAU: *Übersicht über pH-Wert, Wasserhärte und Nitratgehalt des Trinkwassers in den Gemeinden unseres Verbandsgebietes*. (Datenblatt) Internet: <https://www.wavi-ilmenau.de/wasserversorgung/trinkwasserparameter/> (Abruf: 07.10.2018).
- [98] GRÜNBECK WASSERAUFBEREITUNG GMBH: *Betriebsanleitung Enthärtungsanlage Weichwassermeister GSX 5*. 2013.
- [99] JORDAN PROZESSTECHNIK GMBH: *Dampferzeuger Mod. 21.100.03*. (Betriebsanleitung) 2015.
- [100] SAMSON AG: *Einbau- und Bedienungsanleitung EB 5824-2*. 2015.
- [101] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 14597:2015 Temperaturregeleinrichtungen und Temperaturbegrenzer für wärmeerzeugende Anlagen*.
- [102] K. IRRGANG; L. MICHALOWSKY: *Temperaturmesspraxis mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2004. ISBN: 3802722000.
- [103] ENDRESS+HAUSER MESSTECHNIK GMBH+CO. KG: *Technische Information Cerabar M PMC51, PMP51, PMP55*. 2015.
- [104] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 11853-3:2011 Armaturen aus nichtrostendem Stahl für Lebensmittel und Chemie – Teil 3: Hygiene-Klemmverbindung, kurze Ausführung*.
- [105] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 26704:1991 Kondensatableiter - Klassifikation (ISO 6704:1982)*.
- [106] TLV EURO ENGINEERING GMBH: *Einbau- und Betriebsanleitung TLV Freischwimmer Kondensatableiter SS1NL/SS1NH/SS1VL/SS1VH*. 2015.
- [107] TLV EURO ENGINEERING GMBH: *Frei-Schwimmer-Kondensatableiter*. 2015. Internet: https://www.tlv.com/global_pdf/teg/g-pamphlet-0801-hp.pdf (Abruf: 12.11.2017).
- [108] SAMSON AG: *Automationssystem TROVIS 6400 - Kompaktregler TROVIS 6493*. (Einbau- und Bedienungsanleitung) 2015. Internet: <https://www.samson.de/document/e64930de.pdf> (Abruf: 19.02.2018).
- [109] SIEMENS AG: *SIMATIC S7-1500, Analogein-/Ausgabemodul 6ES7534-7QE00-0AB0*. (Datenblatt) 2017.

-
- [110] ENDRESS+HAUSER WETZER GMBH + CO. KG: *Betriebsanleitung Memograph M, RSG45*. 2015.
- [111] LTG AG: *Technischer Prospekt - LTG Hochleistungs - Querstromventilatoren Typenreihe GA/TA/TE t*. 2013.
- [112] COMET SYSTEM S.R.O.: *Web Sensor with PoE - remote thermometer hygrometer barometer with Ethernet interface*. (Datenblatt) Internet: <https://www.cometsystem.com/pdf/T7610> (Abruf: 08.10.2018).
- [113] COMET SYSTEM S.R.O.: *Calibration Certificate No. 15964681/001*. (Kalibrierschein) 2015.
- [114] M. LANGGUTH; O. JÄHRIG; S. R. WAHLER: *Erprobung eines Prüfstandes für Oberflächen-temperaturfühler*. (Projektseminararbeit) Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2017.
- [115] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 4287:2010 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009)*.
- [116] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI/VDE 2602-2:2008 Oberflächenprüfung - Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten - Tastschnittverfahren - Aufbau, Messbedingungen, Durchführung*.
- [117] MITUTOYO AUSTRIA GMBH: *Surftest SJ-210 - Transportables Kuffensystem zur Bestimmung der Oberflächenrauheit für den Einsatz in der Fertigung*. (Datenblatt) 2012. Internet: http://mitutoyo.at/files/9614/2856/6550/PRAT_13442SJ_210_80_WEB.pdf (Abruf: 20.02.2018).
- [118] M&S ARMATUREN GMBH: *Telefonat mit Hersteller am 08.04.2016*.
- [119] JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY: *JCGM 104:2009 Auswertung von Messdaten – Eine Einführung zum "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen" und zu den dazugehörigen Dokumenten*.
- [120] F. ADUNKA: *Messunsicherheiten - Theorie und Praxis*. 3. Aufl. Essen: Vulkan-Verlag, 2007. ISBN: 3802722051.
- [121] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-1:1995 Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*.
- [122] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-3:1996 Grundlagen der Messtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*.
- [123] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-4:1999 Grundlagen der Messtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit*.
- [124] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN ENV 13005:1999 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*.
- [125] E. MENGES; H. MAMMEN: *Kalibrierung der Temperaturfühler für den Sattdampfkanal*. (Kalibrierbericht) 2015.
- [126] ISOTHERMAL TECHNOLOGY LTD.: *Isotech Parallel Tube Liquid Bath: Model 915 - Evaluation Report*. 2000.
- [127] E. MENGES; D. FLOCK; H. MAMMEN: *Kalibrierung des Pt10-151*. (Kalibrierbericht) 2015.
- [128] ISOTHERMAL TECHNOLOGY LTD.: *Isotech mircoK - User Maintenance Manual/Handbook*. (Betriebsanleitung) 2014.
-

- [129] BURSTER PRÄZISIONSMESSTECHNIK GMBH & CO KG: *Kalibrierwiderstände - Typenserie 1240*. (Datenblatt).
- [130] FISCHER ELEKTRONIK GMBH & CO. KG: *f.cool.d - Kühlkörper Lüfteraggregate Wärmeleitmaterial*. (Katalog) 2017.
- [131] LABOM MESS- UND REGELTECHNIK GMBH: *Widerstandsthermometer Clamp-on Technik für die Rohrtemperaturmessung, Typenreihe GA261x*. (Betriebsanleitung).
- [132] WIKA ALEXANDER WIEGAND SE & CO. KG: *Rohroberflächen-Widerstandsthermometer zum Aufkleben Typ TR57-M, Miniaturausführung*. (Datenblatt) 2017.
- [133] WIKA ALEXANDER WIEGAND SE & CO. KG: *Rohroberflächen-Widerstandsthermometer - Miniaturausführung, Typ TR57-M*. (Betriebsanleitung) 2017.
- [134] ENDRESS+HAUSER MESSTECHNIK GMBH+CO. KG: *Rohr-Anlegefühler ZGT4*. (Betriebsanleitung) 2014.
- [135] ENDRESS+HAUSER MESSTECHNIK GMBH+CO. KG: *Temperatur-Rohr-Anlegefühler ZGT4 - Für die Lebensmittel- und Life Sciences Industrie*. (Datenblatt) 2015.
- [136] KLASMEIER KALIBRIER- UND MESSTECHNIK GMBH: *915 Doppelkammer Überlaufbad*. (Datenblatt).
- [137] ISOTHERMAL TECHNOLOGY LTD.: *Parallel Tube Liquid Bath: Model 915 - Evaluation Report*. 2000.
- [138] FLUKE PRECISION MEASUREMENT LTD.: *Certificate of calibration - PT10 Modell 78, Serial No. 152, Certificate No: 1410585*. (Kalibrierschein) 2015.
- [139] PANASONIC ELECTRONIC DEVICES JAPAN CO. LTD.: *Basic Properties and Application Examples of PGS Graphite Sheet*. (Datenblatt) Internet: <http://www.mouser.com/pdfdocs/thermalgraphitesheets.pdf> (Abruf: 17.03.2017).
- [140] PANASONIC ELECTRONIC DEVICES JAPAN CO. LTD.: *"PGS" Graphite Sheets - Type: EYG*. (Datenblatt) 2015. Internet: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/AYA0000/AYA0000C27.pdf> (Abruf: 17.03.2017).
- [141] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 60584-1:2014 Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen*.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Unterschiedliche Bauformen von Rohranlegethermometern mit Ankopplung an ein DN 21,3-Rohr, v. l. n. r. (Hersteller/Typ): Befestigungsmöglichkeit mit Spannband (Claus RFP-100 S), Halbschalen (Emerson 0085) sowie Klemmbügel (Testo 0602 4592)	3
Abb. 2.2: Thermisches Ersatzschaltbild für eine ungestörte (links) und durch ein Rohranlegethermometer gestörte (rechts) Rohraußenwandtemperatur an einem durchströmten Rohrstück bei Betrachtung des Wärmestromverlaufs in radialer Richtung	4
Abb. 2.3: Schematischer Temperaturverlauf für den ungestörten (blau) sowie gestörten (rot) Fall eines mediendurchströmten Rohres	9
Abb. 2.4: Innerer Wärmeübergangskoeffizient α_i in Abhängigkeit von Medium, Mediumtemperatur T_M und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$	16
Abb. 2.5: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur T_M in Abhängigkeit von Medium und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$	16
Abb. 2.6: Abweichung ΔT_R der Rohraußenwandtemperatur von der Rohrrinnenwandtemperatur in Abhängigkeit von Medium, Mediumtemperatur T_M und Strömungsgeschwindigkeit v_i , Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$	17
Abb. 2.7: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwand- von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von Rohrrinnendurchmesser d_i und Rohrwanddicke d_R , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0,18$	
Abb. 2.8: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwand- von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von Rohrrinnendurchmesser d_i und Rohrwanddicke d_R , Medium: Silikonöl ($v_i = 10\text{ m/s}$), Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: Kupfer, $\varepsilon_{Ra} = 0$	19
Abb. 2.9: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur T_M in Abhängigkeit von Rohrmaterial und Emissionsgrad ε (Rohroberflächenbeschaffenheit), Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion	20
Abb. 2.10: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von Rohrlage und Strömungsgeschwindigkeit v_a bei verschiedenen Rohranströmungen, Medium: Sattedampf, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$	21
Abb. 2.11: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von Rohrlage, Strömungsgeschwindigkeit v_a und vers. Rohranströmungen, Medium: Silikonöl ($v_i = 10\text{ m/s}$), Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$	22
Abb. 2.12: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur in Abhängigkeit von der Mediumtemperatur T_M und umgebender EPDM-Isolierung unterschiedlicher Dicke d_{Iso} , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0$	23

Abb. 2.13: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von umgebender EPDM-Isolierung ($\lambda_{iso} = 0,066\text{ W/(m K)}$) unterschiedlicher Dicke d_{iso} und Strömungsgeschwindigkeit v_a bei senkrechter Rohranströmung, Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0 \dots 24$	24
Abb. 2.14: Abweichung ΔT_K der Rohraußenwandtemperatur mit Luftschicht von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von umgebender EPDM-Isolierung unterschiedlicher Dicke d_{iso} und verschiedenen Luftschichtdicken d_{Luft} , Medium: Sattedampf, Rohrlage: horizontal, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0 \dots 25$	25
Abb. 2.15: Abweichung ΔT_{Ra} der Rohraußenwandtemperatur von der Mediumtemperatur ($T_M = 150\text{ °C}$) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_U bei vers. Rohrlagen und Rohrmaterialien, Medium: Silikonöl ($v_i = 10\text{ m/s}$), freie Konvektion, $\varepsilon_{Ra} = 0 \dots 27$	27
Abb. 2.16: Bereiche der Kopplung der Abweichung $ \Delta T_{Ra} $ von der Temperaturdifferenz $ \Delta T_{U,M} $ zwischen Umgebung und Medium mit verschiedenen Medien (Liquide: $v_i = 10\text{ m/s}$) und Rohrlagen sowie bei Variation der Umgebungstemperatur $T_U = 0\text{ °C} \dots 60\text{ °C}$ und der Mediumtemperatur T_M (Silikonöl: $30\text{ °C} \dots 150\text{ °C}$, Wasser: $30\text{ °C} \dots 95\text{ °C}$, Sattedampf: $100\text{ °C} \dots 150\text{ °C}$), freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0 \dots 28$	28
Abb. 2.17: Kopplung der Abweichung $ \Delta T_{Ra} $ von der Temperaturdifferenz $ \Delta T_{U,M} $ zwischen Umgebung und Medium mit verschiedenen Medien (Liquide: $v_i = 10\text{ m/s}$) und Rohrlagen sowie bei Variation der Mediumtemperatur T_M , Umgebungstemperatur $T_U = 20\text{ °C}$, freie Konvektion, Rohrmaterial: V2A, $\varepsilon_{Ra} = 0 \dots 29$	29
Abb. 3.1: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Vorderansicht.....36	36
Abb. 3.2: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Rückansicht.....36	36
Abb. 3.3: Fotografische Darstellung des Gesamtaufbaus, Seitenansichten.....37	37
Abb. 3.4: Wasser- bzw. Sattedampfinstallationsschema, Symbole angelehnt an DIN EN806-1 [96]38	38
Abb. 3.5: Hauptkomponenten der Energie- und Steuerungstechnik (vereinfachte Darstellung)39	39
Abb. 3.6: Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer vor der Montage, Rohrinne Durchmesser: 14 mm, Rohraußendurchmesser: 18 mm42	42
Abb. 3.7: Prüfstrecke mit durchschiebbarem Thermometer (links), Detailansicht des Thermometers mit angelöteten Abstandshaltern vor Montage im DN ½"-Rohr (rechts) ...44	44
Abb. 4.1: Lage der Thermometer zur Messung der Kurzzeitstabilität.....49	49
Abb. 4.2: Temperaturverlauf von Zulaufthermometer (T_{Zul}), Prüfstreckenthermometer ($T_{Prüf}$) und dreier identischer Rohranlegethermometer (T_{Ax}), metallblanke DN ½"-Prüfstrecke 1.....49	49
Abb. 4.3: Einfluss einer Änderung der Umgebungstemperatur ΔT_{Umg} bzw. des absoluten Zulaufdrucks Δp_{abs} auf eine Änderung der Prüfstreckentemperatur $\Delta T_{Prüf\ 1}$ sowie der theoretischen Dampftemperatur $\Delta T_{Dampf\ theo}$, metallblanke DN ½"-Prüfstrecke 1, Anfangswerte zu Null gesetzt52	52

Abb. 4.4: Messabweichung der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers von der Prüf Strecken- (blau) sowie Zulauf temperatur (rot) in Abhängigkeit von der Position im gebeizten DN ½"-Prüf Streckenrohr und der Solltemperatur	55
Abb. 4.5: Messaufbau zur Bestimmung der Umgebungstemperatur um die metallblanken Prüf Strecke 1 mittels Thermometer UR	57
Abb. 4.6: Feld der Temperaturdifferenz zwischen unbeeinflusster und direkt in Rohrnähe gemessener Umgebungstemperatur im Umfeld der metallblanken DN ½"-Prüf Strecke 1..57	
Abb. 4.7: Messaufbau [114] und Strömungsfeld (Daten aus [114]) der ungestörten Lüfterströmung in der Ebene der Prüf Strecken mit den Messpositionen der Rohranlegethermometer für die gebeizte (weiß) sowie alle anderen Prüf Strecken (rot, $y_{\text{Prüf}}$), Lüfterleistung: 100 %.....	58
Abb. 5.1: Schematische Messkette zur Bestimmung der Messunsicherheit der gemessenen und korrigierten Mediumstemperatur $T_{\text{Prüf}}$ mittels eines Prüf Streckenthermometers.....	61
Abb. 6.1: Untersuchte Rohranlegethermometer, v. l. n. r.: Labom GA2610, Sensonic TMPT100A, Wika TR57-M und E+H ZGT4	72
Abb. 6.2: Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage mit Messabweichung ΔT_{Ax} , Thermometer A1 – 3, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, kalt: Zwischenabkühlung mit $T_{\text{Prüf}} \approx T_{\text{Umg}}$, Gerade: Mittelwert.....	75
Abb. 6.3: Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage am gebeizten Prüf Streckenrohr mit Messabweichung ΔT_{x} , Thermometer B1, C1 und D1 – 2, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, Gerade: Mittelwert	76
Abb. 6.4: Messabweichung ΔT_{Ax} von der Prüf Streckentemperatur in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums an verschiedenen Rohroberflächen, Thermometer A1 – 3 ...	77
Abb. 6.5: Querschnittsprofile des eingelassenen Sensors von A1 – 3 über dessen Mittelpunkt mit theoretisch eingezeichnetem angelegten DN ½"-Rohr	78
Abb. 6.6: Messabweichung ΔT_{x} in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums, z. T. an verschiedenen Rohroberflächen, Thermometer A1, B1, C1, D1 und D2	79
Abb. 6.7: Thermische Kopplung bei den Thermometern A1, A2, A3, B1, C1, D1 und D2 an verschiedenen Prüf Streckenrohren.....	80
Abb. 6.8: Verwendete 2 Messaufbauten an der gebeizten Prüf Strecke zur Ermittlung des Einflusses von erzwungener Konvektion.....	82
Abb. 6.9: Messabweichung ΔT_{x} von der Prüf Streckentemperatur am gebeizten Prüf Streckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit	82
Abb. 6.10: Prozentuale Messabweichung $\Delta T_{\% \text{x}}$ von der Prüf Streckentemperatur bezogen auf $\Delta T_{\text{x}}(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}})$ am gebeizten Prüf Streckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit.....	83
.....	84
Abb. 6.11: Beispielhafte Anordnung der Rohranlegethermometer an der gebeizten Prüf Strecke mit v. l. n. r. teilweiser sowie vollständiger Isolierung.....	84

Abb. 6.12: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke in Abhängigkeit von Solltemperatur des Mediums und Strömungsgeschwindigkeit.....	85
Abb. 6.13: Prozentuale Messabweichung $\Delta T_{\%x}$ von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke bezogen auf $\Delta T_x(v_{\text{Lüfter}} = 0, T_{\text{Soll}})$ am gebeizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von Solltemperatur des Mediums und Strömungsgeschwindigkeit	86
Abb. 6.14: Thermische Kopplung bei den Thermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am gebeizten Prüfstreckenrohr ohne sowie mit teilweiser (nur angrenzende Rohrstücke) und vollständiger Isolierung	87
Abb. 6.15: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr mit vollständiger Isolierung in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit	88
Abb. 6.16: Verwendete 2 Messaufbauten an der gebeizten Prüfstrecke zur Ermittlung der Umgebungstemperaturänderung.....	89
Abb. 6.17: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_{UR} mit den jeweiligen Standardabweichungen sowie Interpolation durch lineare Regression, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$	89
Abb. 6.18: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur als Mittelwert zwischen den Messabweichungen bei aufsteigender ($\Delta T_{x\text{ auf}}$) und absteigender ($\Delta T_{x\text{ ab}}$) Temperierung am gebeizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur	92
Abb. 6.19: Verwendeter Wasser-Strömungskanal.....	95
Abb. 6.20: Messaufbau am Wasser-Strömungskanal mit Rohranlegethermometern, Umgebungsthermometer UR sowie Lage des durchschiebbaren Thermometers (DST) im Rohr	96
Abb. 6.21: Messabweichung ΔT_x von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern A1, B1 und C1 in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und der Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der gebeizten Prüfstrecke	97
Abb. 6.22: Messabweichung ΔT_x von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern C1, D1 und D2 in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und der Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der gebeizten Prüfstrecke	97
Abb. 6.23: Endwertbezogene Messabweichung $\Delta T_{\text{Ew } x}$ von der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers bei den Thermometern A1, B1, C1, D1 und D2 in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit v_{Wasser} und Solltemperatur T_{Soll} im Wasser-Strömungskanal mit der gebeizten Prüfstrecke.....	98
Abb. 6.24: Thermische Kopplung bei den Rohranlegethermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am Wasser-Strömungskanal mit ausgewählten Strömungsgeschwindigkeiten in der gebeizten Prüfstrecke im Vergleich zum theoretischen Modell	99

Abb. 6.25: Thermische Kopplung bei den Rohranlegethermometern A1, B1, C1, D1 und D2 am Wasser-Strömungskanal mit der gebeizten Prüfstrecke im Vergleich zum Sattedampf-Prüfstand sowie dem theoretischen Modell	101
Abb. A1: Mikroskopbilder der Oberflächenbeschaffenheit der DN ½"-Prüfstrecken bei gleichem Abstand und Vergrößerungsfaktor (ca. 40 x)	142
Abb. A2: Darstellungen der Umgebungstemperatur T_{UR} mit Standardabweichung $s(T_{UR})$ und Differenz zur Prüfstreckentemperatur $\Delta T_{UR - \text{Prüf } 1}$	143
Abb. A3: Profil der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ bei verschiedenen Lüfterleistungen mit äquivalenten Messpositionen bei der gebeizten (weiß) sowie allen anderen (rot) Prüfstrecken.....	144
Abb. A4: Messplanstruktur mit Messmöglichkeiten der ausgewählten Rohranlegethermometer	145

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Güteklassen für Anlege- und Gehäusefühler in der Gebäudeautomation, nach [1]	11
Tab. 3.1: Übersicht der vorhandenen Prüfstreckenrohre, Werkstoff: 1.4435, Länge: 700 mm	43
Tab. 4.1: Messabweichungen der Prüfstrecken- von der Zulauf-temperatur bei Prüfstrecke 1 und verschiedenen Solltemperaturen.....	50
Tab. 4.2: Messabweichungen der Prüfstrecken- von der Zulauf-temperatur bei verschiedenen geöffneten Prüfstrecken und 150 °C Solltemperatur.....	50
Tab. 4.3: Standardabweichungen der Prüfstrecken- und Zulauf-temperatur bei verschiedenen geöffneten Prüfstrecken und 150 °C Solltemperatur.....	51
Tab. 4.4: Axialer Mittenrauwert R_a verschiedener DN ½"-Rohroberflächen	54
Tab. 4.5: Strömungsgeschwindigkeit an den Messpositionen bei verschiedenen Lüfterleistungen	59
Tab. 5.1: Messunsicherheitsbudget für die Sensortemperatur T_s der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer unter Einsatz- und Umgebungsbedingungen.....	64
Tab. 5.2: Messunsicherheitsbudget für den Anzeigewert T_A der Memographen	65
Tab. 5.3: Messunsicherheitsbudget für die Korrektur ΔT_v durch Vergleichskalibrierung der Zulauf- bzw. Prüfstreckenthermometer	69
Tab. 5.4: Messunsicherheitsbudget für die Korrektur ΔT_{Me} der Memographen	70
Tab. 6.1: Eigenschaften der untersuchten Rohranlegethermometer, Herstellerangaben.....	73
Tab. 6.2: Mittelwerte der einzelnen Messabweichungen ΔT_x durch (De-) Montage aller Rohranlegethermometer an unterschiedlichen Rohroberflächen, $T_{\text{Prüf}} \text{ konst. } \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$	76
Tab. 6.3: Übersicht der Streuungen durch (De-) Montage aller Rohranlegethermometer (Standardabweichung s_x aller einzelnen Messabweichungen ΔT_x), $T_{\text{Prüf}} \text{ konst. } \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$	76

Tab. 6.4: Kopplungsfaktor B der Messabweichung $ \Delta T_x $ auf die Temperaturdifferenz $ T_{\text{Umg}} - T_{\text{Prüf}} $ bei annähernd konst. Umgebungstemperatur T_{Umg}	81
Tab. 6.5: Vergleich der Messabweichungen der Temperaturmessung von A1, B1 und C1 ohne sowie mit Isolierung der angrenzenden Rohrstücke in Abhängigkeit von der Solltemperatur	84
Tab. 6.6: Empfindlichkeit der Messabweichung ΔT_x auf Umgebungstemperaturänderungen ΔT_{UR} im Vergleich zum theoretischen Modell bei $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$	90
Tab. 6.7: Vergleich der Messabweichungen für die Thermometer A1 – 3 am metallblanken Prüfstreckenrohr ohne sowie mit Wärmeleitpaste/-folie in Abhängigkeit von der Solltemperatur	91
Tab. 6.8: Einfluss von parasitären Thermospannungen auf die Messabweichungen der Temperaturmessung mittels Rohranlegethermometern bei $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$	94
Tab. 6.9: Kopplungsfaktor $B (= \Delta T_x / \Delta T_{\text{UR}})$ für die Rohranlegethermometer bei den Medien Wasser und Sattedampf im Vergleich zum theoretischen Modell	102
Tab. A1: $\Delta T_{\text{DST - Prüf2}}$ und $\Delta T_{\text{DST - Zul}}$ der 3 Messpositionen bei unterschiedlichen Solltemperaturen	143
Tab. A2: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels A1 – 3 durch (De-) Montage am metallblanken Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 1}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$	146
Tab. A3: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels A1 – 3 durch (De-) Montage am glasperlengestrahlten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 3}} \approx 150\text{ °C}$	146
Tab. A4: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels B1 und C1 durch (De-) Montage am gebeizten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 2}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$, Position des DST im Bereich von B1	147
Tab. A5: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels D1 – 2 durch (De-) Montage am gebeizten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 2}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$, Position des DST im Bereich von D2	148
Tab. A6: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 – 3 von der Prüfstreckentemperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am metallblanken Prüfstreckenrohr.....	148
Tab. A7: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 – 3 von der Prüfstreckentemperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am glasperlengestrahlten Prüfstreckenrohr.....	149
Tab. A8: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Prüfstreckentemperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am metallblanken Prüfstreckenrohr.....	149
Tab. A9: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Prüfstreckentemperatur bzw. der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers im jeweiligen Bereich bei verschiedenen Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr	150
Tab. A10: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Prüfstreckentemperatur bzw. der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers im	

jeweiligen Bereich bei verschiedenen Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr	150
Tab. A11: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	151
Tab. A12: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	151
Tab. A13: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1 von der Prüfstreckentemperatur an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	152
Tab. A14: Messabweichung der Temperaturmessung mit D1 von der Prüfstreckentemperatur an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	152
Tab. A15: Vergleich der Messabweichungen der Temperaturmessung mit A1, B1, C1 und D1 ohne sowie mit vollständiger Isolierung in Abhängigkeit von der Solltemperatur.....	153
Tab. A16: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der umgebenden Rohrstücke an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	153
Tab. A17: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der umgebenden Rohrstücke an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	154
Tab. A18: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	154
Tab. A19: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	155
Tab. A20: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der gebeizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit	155
Tab. A21: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Temperatur des, mittig positionierten, durchschiebbaren Thermometers bei vers. Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr	156
Tab. A22: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Temperatur des, mittig positionierten, durchschiebbaren Thermometers bei vers. Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr	156
Tab. A23: Übersicht über Hersteller und Typen von Rohranlegethermometern, teilweise aus [114].....	157

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	Koeffizient der Abweichungsfunktion
a	variabel	Wert der Grenzabweichung
a_+	variabel	obere Grenze
a_-	variabel	untere Grenze
A_i	m^2	Fläche der Rohrrinnenwand
A_P	$1/^\circ\text{C}$	korrigierter linearer Koeffizient der Pt100-Kennlinie
A_{Ra}	m^2	Fläche der Rohraußenwand
A_U	m^2	Fläche der Umgebung
α_a	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	äußerer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohraußenwand und Umgebung
$\bar{\alpha}_a$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	mittlerer äußerer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohraußenwand und Umgebung
α_i	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	innerer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Medium und Rohrrinnenwand
$\bar{\alpha}_i$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	mittlerer innerer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Medium und Rohrrinnenwand
α_K	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Wärmeübergangskoeffizient des thermischen Kontaktwiderstands
α_R	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Wärmeübergangskoeffizient der Rohrwand
b	m	Sehne des Rohraußendurchmessers
b	m	Ablaufbreite
B	-	Kopplungsfaktor; allgemein
B_P	$1/^\circ\text{C}^2$	korrigierter quadratischer Koeffizient der Pt100-Kennlinie
B_{rel}	-	Kopplungsfaktor, gemäß VDI/VDE 3512-4
β	$1/\text{K}$	isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_i	variabel	Empfindlichkeit, allgemein
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische isobare Wärmekapazität
$c_{V \text{ M Drift}}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch Langzeitdrift des Messgerätes Isotech microK 70
$c_{V \text{ M Stab}}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch Kurzzeitstabilität des Messgerätes Isotech microK 70
$c_{V \text{ M M U}}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch Umgebungs-temperaturänderung des Messgerätes Isotech microK 70

$c_{V\ N\ Drift}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch eine mögliche Drift des Pt10-Normals
$c_{V\ N\ Kal}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch Kennlinienbestimmung des Pt10-Normals
$c_{V\ P\ Stab}$	Ω/K	Empfindlichkeit der Abweichung durch Kurzzeitstabilität der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
d_a	m	Rohraußendurchmesser
d_i	m	Rohrinnendurchmesser
d_{Iso}	m	Isolierdicke
d_{Luft}	m	Luftschichtdicke
d_R	m	Rohrwandstärke
ε_{Ra}	-	Emissionsgrad der Oberfläche der Rohraußenwand
ε_U	-	Emissionsgrad der Umgebung
η	kg/(m s)	dynamische Viskosität
f_w	-	Welligkeitskorrektur
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
Gr	-	Grashof-Zahl
Γ	kg/(m s)	Berieselungsdichte
h	J s	Plancksches Wirkungsquantum
h	J/kg	spezifische Enthalpie
i	-	Durchlaufvariable
$i_{\lambda\ s}$	W/m ³	spektralspezifische Intensität der schwarzen Strahlung
k	J/K	Boltzmannkonstante
k	-	Erweiterungsfaktor
K_p	-	Verstärkungsfaktor
l	m	Rohrlänge
l_n	m	Messstreckenlänge zur Bestimmung der Rauigkeit
L_S	m	Überstromlänge
L'	-	dimensionslose Länge
λ	m	Wellenlänge
λ_{Iso}	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der thermischen Isolierung
λ_K	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Kontaktmaterials, allgemein
$\lambda_{K\ x}$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Kontaktmaterials in x-Richtung

$\lambda_{K y}$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Kontaktmaterials in y-Richtung
λ_R	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
n	-	Anzahl
Nu	-	Nußelt-Zahl
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
p_{abs}	bar	absoluter Zulaufdruck
p_{atm}	bar	atmosphärischer Druck, bestimmt mit Klimadatenlogger
p_{rel}	bar	relativer Zulaufdruck, bestimmt mit Zulauf-Druckmesser
p_{Soll}	bar	relativer Solldruck
Pr	-	Prandtl-Zahl
Δp_{abs}	bar	Änderung des absoluten Zulaufdrucks
\bar{q}	variabel	arithmetischer Mittelwert
\dot{q}	W/m ²	Wärmestromdichte, allgemein
q_i	variabel	Einzelmesswert
\dot{q}_P	W/m ²	Wärmestromdichte ausgehend vom schwarzen Strahler
\dot{q}_{Ra}	W/m ²	Wärmestromdichte bei Strahlung von Rohroberfläche an Umgebung
\dot{Q}	W	Wärmestrom, ungestört
\dot{Q}_E	W	Wärmestrom, emittierter
\dot{Q}_g	W	Wärmestrom, gestört
$\dot{Q}_{K g}$	W	Wärmestrom durch Konvektion an die Umgebung, gestört
\dot{Q}_K	W	Wärmestrom durch Konvektion an die Umgebung, ungestört
\dot{Q}_R	W	Wärmestrom, reflektierter
\dot{Q}_{Ra}	W	Wärmestrom ausgehend von Rohraußenwand
$\dot{Q}_{S g}$	W	Wärmestrom durch Strahlung an die Umgebung, gestört
\dot{Q}_S	W	Wärmestrom durch Strahlung an die Umgebung, ungestört
\dot{Q}_U	W	Wärmestrom ausgehend von Umgebung
r	m	Tastspitzenradius
r_i	m	Innenradius
r_K	m	Krümmungsradius
R	K/W	thermischer Widerstand, allgemein
R_{100}	Ω	Widerstand des 100 Ω -Normals
R_{200}	Ω	Widerstand des 200 Ω -Normals
Ra	m	arithmetischer Mittenrauwert

$R_{A\text{ Std}}$	Ω	mittels Pt100-Standardkennlinie umgerechneter Anzeigewert des Memographs
R_B	K/W	thermischer Widerstand zwischen Sensor und Bauteiloberfläche
R_K	K/W	thermischer Widerstand der Kontaktierung
R_M	K/W	thermischer Widerstand zwischen Medium und Rohrwand, ungestört
$R_{M\text{ g}}$	K/W	thermischer Widerstand zwischen Medium und Rohrwand, gestört
$R_{M\text{ R}}$	K/W	thermischer Widerstand zwischen Medium und Rohrrinnenwand
$R_{N\text{ Bad}}$	Ω	Anzeigewert des Messgerätes Isotech microK 70 für mittels Pt10-Normal gemessene Badtemperatur
$R_{P\text{ Bad}}$	Ω	Anzeigewert des Messgerätes Isotech microK 70 für mittels Prüfgegenstand gemessene Badtemperatur
R_{P0}	Ω	korrigierter Grundwiderstandswert der Pt100-Kennlinie des Prüfgegenstands
R_R	K/W	thermischer Widerstand der Rohrwand, ungestört
$R_{R\text{ g}}$	K/W	thermischer Widerstand der Rohrwand, gestört
R_S	K/W	thermischer Widerstand zwischen Kontaktierung und Sensor
$R_{U\text{ K}}$	K/W	thermischer Widerstand zur Umgebung durch Konvektion, ungestört
$R_{U\text{ K g}}$	K/W	thermischer Widerstand zur Umgebung durch Konvektion, gestört
$R_{U\text{ S}}$	K/W	thermischer Widerstand zur Umgebung durch Strahlung, ungestört
$R_{U\text{ S g}}$	K/W	thermischer Widerstand zur Umgebung durch Strahlung, gestört
Re	-	Reynolds-Zahl
$\delta R_{V\text{ M Drift}}$	Ω	Abweichung durch Langzeitdrift des Messgerätes Isotech microK 70
$\delta R_{V\text{ M Stab}}$	Ω	Abweichung durch Kurzzeitstabilität des Messgerätes Isotech microK 70
$\delta R_{V\text{ M U}}$	Ω	Abweichung durch Umgebungstemperaturänderung des Messgerätes Isotech microK 70
$\delta R_{V\text{ N Drift}}$	Ω	Abweichung durch eine mögliche Drift des Pt10-Normals
$\delta R_{V\text{ N Kal}}$	Ω	Abweichung durch Kennlinienbestimmung des Pt10-Normals
$\delta R_{V\text{ P Stab}}$	Ω	Abweichung durch Kurzzeitstabilität der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
ρ	kg/m ³	spezifische Dichte
s	variabel	Standardabweichung des Mittelwertes

σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante
t	s	Zeit, allgemein
T	°C	Temperatur, allgemein
$T_{100 \text{ gem}}$	°C	Anzeigewert des Memographs für 200 Ω -Normal
$T_{100 \text{ Std}}$	°C	Temperatur des 100 Ω -Normals, theoretisch mittels Pt100-Standardkennlinie bestimmt
$T_{200 \text{ gem}}$	°C	Anzeigewert des Memographs für 200 Ω -Normal
$T_{200 \text{ Std}}$	°C	Temperatur des 200 Ω -Normals, theoretisch mittels Pt100-Standardkennlinie bestimmt
T_A	°C	Anzeigewert des Memographs
$T_{A \text{ korrr}}$	°C	korrigierter Anzeigewert des Memographs
T_{Ba}	°C	Temperatur des Befestigungssystems, außen
T_{Bad}	°C	Badtemperatur, tatsächlich
$T_{\text{Dampf theo}}$	°C	Dampftemperatur, theoretisch berechnet
T_{DST}	°C	Mediumtemperatur, bestimmt durch durchschiebbares Thermometer, korrigiert
T_{gem}	°C	Anzeigewert des Memographs bei Widerstandsnorm
$T_{K a}$	°C	Temperatur der Kontaktierung, außen
T_M	°C	Mediumtemperatur auf der Rohrachse
T_N	°C	Temperatur des Pt10-Normals
T_N	s	Nachstellzeit
$T_{N \text{ Bad}}$	°C	Badtemperatur, mittels Pt10-Normal gemessen
$T_{N \text{ Bad korrr}}$	°C	korrigierte Badtemperatur, mittels Pt10-Normal gemessen
T_P^*	K	Temperatur des schwarzen Strahlers
$T_{P \text{ Bad}}$	°C	Badtemperatur, mittels Prüfgegenstand gemessen
$T_{\text{Prüf}}$	°C	Prüfstreckentemperatur, bestimmt durch Prüfstreckenthermometer, korrigiert
T_{Ra}	°C	Rohraußenwandtemperatur, ungestört
T_{Ra}^*	K	Rohraußenwandtemperatur
$T_{Ra g}$	°C	Rohraußenwandtemperatur, gestört
$\bar{T}_{Ra U}$	°C	Temperaturmittelwert zwischen Rohraußenwand und Umgebung
T_{Ri}	°C	Rohrinnenwandtemperatur, ungestört
$T_{Ri g}$	°C	Rohrinnenwandtemperatur, gestört
T_S	°C	Sensortemperatur
T_{Soll}	°C	Solltemperatur
T_{Std}	°C	Temperatur, mittels Pt100-Standardkennlinie bestimmt
T_U	°C	Umgebungstemperatur, theoretisch

T_{Umg}	°C	Umgebungstemperatur, bestimmt durch Umgebungsthermometer des Prüfstandes
T_{UR}	°C	Umgebungstemperatur, bestimmt im Umfeld der Prüfstrecke
T_{V}	s	Vorhaltzeit
T_{x}	°C	Temperatur des jeweiligen Rohranlegethermometers
T_{Zul}	°C	Zulauf-Referenzthermometer
δT_{A}	K	Abweichungen durch Anzeigewert der Memographen
$\delta T_{\text{A Auf}}$	K	Abweichung durch Anzeigeauflösung der Memographen
$\delta T_{\text{A Drift}}$	K	Abweichung durch eine mögliche zeitliche Drift der Memographen
$\delta T_{\text{A gem}}$	K	Abweichung durch Kurzzeitstabilität der Memographen
$\delta T_{\text{A U}}$	K	Abweichung durch Umgebungstemperatur der Memographen
δT_{Me}	K	Abweichungen durch Korrektur der Memographen
$\delta T_{\text{Me Ref Kal}}$	K	Abweichung durch Messunsicherheit der Widerstandsnormale
$\delta T_{\text{Me Ref U}}$	K	Abweichung durch Umgebungstemperatur der Widerstandsnormale
$\delta T_{\text{Me U}}$	K	Abweichung durch Umgebungstemperaturänderung der Widerstandsnormale
δT_{U}	K	Abweichungen durch Einsatz- und Umgebungsbedingungen
$\delta T_{\text{U Ew}}$	K	Abweichung durch Eigenerwärmung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer im Prüfstand
$\delta T_{\text{U Lage}}$	K	Abweichung durch anderen Anklemmbereich
$\delta T_{\text{U par}}$	K	Abweichung durch parasitäre Thermospannungen der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer.
$\delta T_{\text{U Stab}}$	K	Abweichung durch Kurzzeitstabilität der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer im Prüfstand
$\delta T_{\text{U U}}$	K	Abweichung durch Umgebungstemperatur der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer im Prüfstand
$\delta T_{\text{U Wa}}$	K	Abweichung durch Wärmeableitung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer im Prüfstand
$\delta T_{\text{V B}}$	K	Abweichungen durch Badthermostat
$\delta T_{\text{V B Hom}}$	K	Abweichung durch vertikale Homogenität des Badthermostaten
$\delta T_{\text{V B Stab}}$	K	Abweichung durch gemessene zeitliche Stabilität des Badthermostaten
$\delta T_{\text{V N}}$	K	Abweichungen durch Pt10-Normal
$\delta T_{\text{V N Ew}}$	K	Abweichung durch Eigenerwärmung des Pt10-Normals
$\delta T_{\text{V N Wa}}$	K	Abweichung durch Wärmeableitung des Pt10-Normals
$\delta T_{\text{V P Drift}}$	K	Abweichung durch Drift der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer

$\delta T_{V P Ew}$	K	Abweichungen der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
$\delta T_{V P Ew}$	K	Abweichung durch Eigenerwärmung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
$\delta T_{V P Hys}$	K	Abweichung durch Hystereseeffekte der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
$\delta T_{V P Ken}$	K	Abweichung durch Kennlinienumrechnung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer mit Standardkennlinie
$\delta T_{V P par}$	K	Abweichung durch parasitäre Thermospannungen der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
$\delta T_{V P Wa}$	K	Abweichung durch Wärmeableitung der Zulauf- und Prüfstreckenthermometer
Δt	s	Zeitdifferenz
$\Delta T_{100 Me}$	K	Messabweichung des 100 Ω -Normals
$\Delta T_{200 Me}$	K	Messabweichung des 200 Ω -Normals
$\Delta T_{Dampf theo}$	K	Änderung der theoretisch berechneten Dampftemperatur
$\Delta T_{Ew x}$	K	endwertbezogene Temperaturdifferenz des jeweiligen Rohranlegethermometers
ΔT_K	K	Temperaturdifferenz zwischen äußerer Kontaktierung und Medium
ΔT_M	K	Temperaturdifferenz zwischen Medium und Rohrrinnenwand
ΔT_{Me}	K	Messabweichung des Memographs
ΔT_R	K	Temperaturdifferenz zwischen Rohrrinnenwand und Rohraußenwand
ΔT_{Ra}	K	Temperaturdifferenz zwischen Medium und Rohraußenwand
$\Delta T_{S M}$	K	Temperaturdifferenz zwischen Sensor und Medium
ΔT_U	K	Temperaturdifferenz zwischen Rohraußenwand und Umgebung
$\Delta T_{U M}$	K	Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Medium
ΔT_{Umg}	K	Umgebungstemperaturänderung, bestimmt durch Umgebungsthermometer des Prüfstandes
ΔT_{UR}	K	Umgebungstemperaturänderung, bestimmt im Umfeld der Prüfstrecke
ΔT_x	K	Messabweichung zwischen jeweiligen Rohranlege- und Prüfstreckenthermometer bzw. durchschiebbarem Thermometer
$\Delta T_{x \%}$	%	relative Messabweichung zwischen jeweiligen Rohranlege- und Prüfstreckenthermometer bzw. durchschiebbarem Thermometer
$\Delta T_{x ab}$	K	Messabweichung zwischen jeweiligen Rohranlege- und Prüfstreckenthermometer, bei absteigender Temperierung
$\Delta T_{x auf}$	K	Messabweichung zwischen jeweiligen Rohranlege- und Prüfstreckenthermometer, bei aufsteigender Temperierung

$\Delta T_{x\ G}$	K	Grenzabweichung nach DIN EN 60751 für jeweiliges Rohranlegethermometer
$\Delta T_{x\ p}$	K	mittlere Differenz des jeweiligen Rohranlegethermometers durch parasitäre Thermospannungen
$u(x_i)$	variabel	Standardmessunsicherheit der Einflussgröße
$u_c(y)$	variabel	kombinierte Messunsicherheit des Messergebnisses
$U(y)$	variabel	erweiterte Messunsicherheit des Messergebnisses
v_a	m/s	Strömungsgeschwindigkeit, außen
v_i	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Rohrmediums
$v_{\text{Lüfter}}$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Lüfters
v_{Wasser}	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Wasser-Strömungskanals
ΔW_N	-	Abweichungsfunktion
x	m	Abszissenachse, allgemein
x_i	variabel	Einflussgröße
X	-	Krümmungsparameter
y	variabel	Messergebnis
y	m	Ordinatenachse, allgemein
y_{DST}	m	Ortskoordinate entlang der gebeizten Prüfstrecke
$y_{\text{Prüf}}$	m	Ortskoordinate entlang der metallblanken, glasperlen- gestrahlten und elektropolierten Prüfstrecke
z	m	Höhe der Vertiefung
Z	m	Höhe, örtliche, zur Bestimmung der Rauigkeit

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AC	Wechselstrom
Cu	Kupfer
Cu-DHP	Kupfer, desoxidiert, sauerstofffrei
DC	Gleichstrom
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
DN	Nennweite des Rohres
DST	durchschiebbares Thermometer, eingesetzt in der geheizten Prüfstrecke
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FEM	Finite-Elemente-Methode
FI	Fehlerstrom
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
MW	Mittelwert
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PP	Polypropylen
Prüf	Prüfstrecke
Pt10	Widerstandsthermometer, Grundwert 10 Ω bei 0 °C
Pt100	Widerstandsthermometer, Grundwert 100 Ω bei 0 °C
Pt1000	Widerstandsthermometer, Grundwert 1000 Ω bei 0 °C
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SOF	Wasserenthärtungsanlage
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TGA	Güteklasse nach VDI/VDE 3512-2
UR	Umgebungsthermometer, eingesetzt im Umfeld der Prüfstrecke
V2A	rostfreier Edelstahl
VA	rostfreier Edelstahl

Anhang

A1 Theoretische Berechnungen	136
A1.1 Innerer Wärmeübergangskoeffizient bei strömenden Fluiden.....	136
A1.2 Innerer Wärmeübergangskoeffizient bei ruhendem Sattdampf.....	137
A1.3 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient bei freier Konvektion.....	138
A1.4 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion.....	139
A1.5 Berechnung der theoretischen Sattdampftemperatur	141
A2 Messprotokolle.....	142
A2.1 Mikroskopbilder der Prüfstrecken-Oberflächen	142
A2.2 Messabweichung der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers an 3 Messpositionen sowie unterschiedlichen Solltemperaturen	143
A2.3 Umgebungstemperatur im direktem Rohrumfeld	143
A2.4 Erzielbare Strömungsgeschwindigkeiten des Lüfters	144
A2.5 Messplanstruktur.....	145
A2.6 Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage.....	146
A2.7 Messabweichung von der Mediumstemperatur	148
A2.8 Einfluss von erzwungener Konvektion.....	151
A2.9 Einfluss von Isolierung	153
A2.10 Vergleich mit Messungen am Sattdampf-Prüfstand.....	156
A3 Übersicht über Hersteller und Typen von Rohranlegethermometern ..	157
A4 Thesen	161
A5 Selbstständigkeitserklärung	162

A1 Theoretische Berechnungen

A1.1 Innerer Wärmeübergangskoeffizient bei strömenden Fluiden

Für die, in dieser Arbeit betrachteten, strömenden Fluide kann zunächst die Prandtl-Zahl Pr_i mit Bezug auf die Mediumstemperatur T_M wie folgt berechnet werden [51, Gl. 3.6]:

$$Pr_i = \frac{v_i(T_M) \cdot \rho_i(T_M) \cdot c_{p,i}(T_M)}{\lambda_i(T_M)} \quad (A1.1)$$

Die hierbei auftretenden Größen kinematische Viskosität v_i , spezifische Dichte ρ_i , spezifische isobare Wärmekapazität $c_{p,i}$ und Wärmeleitfähigkeit λ_i sind Stoffdatentabellen zu entnehmen, dabei zwangsläufig fehlende Zwischenwerte der Stoffdaten in Abhängigkeit von der Temperatur wurden in der vorliegenden Arbeit linear interpoliert.

Mit Hilfe der, durch die Strömungsgeschwindigkeit v_i des Mediums, dem Rohrrinnendurchmesser d_i sowie der kinematischen Viskosität v_i bestimmten, Reynolds-Zahl Re_i [51, Gl. 3.5]

$$Re_i = \frac{v_i \cdot d_i}{v_i(T_M)} \quad (A1.2)$$

können zunächst 3 Fälle der Strömungsausprägung unterschieden werden. Bei Werten von Re_i bis 2.300 ist die Strömung als laminar anzusehen, im Übergangsbereich zwischen 2.300 und 10^4 beeinflussen Rohreinlauf sowie Zuströmungsform die Ausprägung und ab 10^4 kann von turbulenter Strömung ausgegangen werden.

Aus [50, Gl. G1-17/18/19] kann für den laminaren Strömungsfall bei einem Verhältnis von $d_i/l \leq 0,1$ die mittlere Nußelt-Zahl $Nu_{i,lam}$ zu

$$Nu_{i,lam} = \left(4,364^3 + 0,6^3 + \left(1,953 \cdot \left(Re_i \cdot Pr_i \cdot \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,6 \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.3)$$

bestimmt werden. Für Werte $d_i/l > 0,1$ erweitert sich Gl. (A1.3) mit [50, Gl. G1-24/25] zu:

$$Nu_{i,lam} = \left(4,364^3 + 0,6^3 + \left(1,953 \cdot \left(Re_i \cdot Pr_i \cdot \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,6 \right)^3 + \left(0,924 \cdot Pr_i^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{Re_i \cdot \frac{d_i}{l}} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.4)$$

Die mittlere Nußelt-Zahl $Nu_{i,\bar{u}}$ für den Übergangsbereich ist, gemäß [50, Gl. G1-29/30]

$$Nu_{i,\bar{u}} = (1 - \gamma) \cdot Nu_{2,300} + \gamma \cdot Nu_{10^4} \quad (A1.5)$$

mit

$$\gamma = \frac{Re_i - 2.300}{10^4 - 2.300} \quad (A1.6)$$

sowie der Nußelt-Zahl $Nu_{2,300}$ bei der Randbedingung $Re = 2.300$ [50, Gl. G1-34/35/36]

$$Nu_{2,300} = \left(83,326 + \left(1,953 \cdot \left(2.300 \cdot Pr_i \cdot \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,6 \right)^3 + \left(0,924 \cdot Pr_i^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{2.300 \cdot \frac{d_i}{l}} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.7)$$

und der Nußelt-Zahl Nu_{10^4} bei der Randbedingung $Re = 10^4$ [50, Gl. G1-37]:

$$Nu_{10^4} = \frac{\frac{0,0308}{8} \cdot 10^4 \cdot Pr_i}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{0,0308}{8} \cdot (Pr_i^{\frac{2}{3}} - 1)}} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad (A1.8)$$

Die Gültigkeit für vorgenannten Übergangsbereich ist auf $0,6 \leq Pr \leq 1.000$ sowie $d_i/l \leq 1$ beschränkt.

Für die mittlere Nußelt-Zahl $Nu_{i \text{ turb}}$ bei turbulenter Strömung gilt [50, Gl. G1-26/27]

$$Nu_{i \text{ turb}} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re_i \cdot Pr_i}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot (Pr_i^{\frac{2}{3}} - 1)}} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad (A1.9)$$

mit

$$\xi = (1,8 \cdot \log Re_i - 1,5)^{-2} \quad (A1.10)$$

und dem Gültigkeitsbereich $0,1 \leq Pr_i \leq 1.000$ sowie $d_i/l \leq 1$.

Aus der jeweiligen Nußelt-Zahl kann nunmehr der mittlere innere Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_i$ zwischen strömenden Medium und der Rohrrinnenwand bestimmt werden:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{Nu_i(T_M) \cdot \lambda_i(T_M)}{d_i} \quad (A1.11)$$

A1.2 Innerer Wärmeübergangskoeffizient bei ruhendem Sattedampf

Zunächst kann die Berieselungsdichte Γ , welche dem Wärmestrom \dot{Q} dividiert durch das Produkt aus Ablaufbreite b und spezifischer Enthalpie h entspricht, wie folgt bestimmt werden [51, Gl. 5.29]

$$\Gamma = \frac{\dot{Q}}{b \cdot h(T_{Ra})} \quad (A1.12)$$

mit $b = l$ bei horizontaler Rohrlage bzw. $b = \pi \cdot d_i$ bei lotrechter Rohrlage.

Daraus folgt die Reynolds-Zahl Re_i mit der dynamischen Viskosität η_{iF} der siedenden Flüssigkeit zu [50, Gl. J1-11]:

$$Re_i = \frac{\Gamma}{\eta_{iF}(T_{Ri})} \quad (A1.13)$$

Zu einem verbesserten Wärmeübergang kann es durch Ausprägung einer wellenartigen Filmströmung an der Rohrrinnenwand kommen, was durch die Welligkeitskorrektur f_w beschrieben werden kann [50, Gl. J1-12]:

$$f_w = \begin{cases} 1 & \text{für } Re_i < 1 \\ Re_i^{0,04} & \text{für } Re_i \geq 1 \end{cases} \quad (A1.14)$$

Die Nußelt-Zahl $Nu_{i \text{ lam l}}$ im laminaren Bereich und lotrechter Rohrlage bestimmt sich mit Hilfe der spezifischen Dichte der siedenden Flüssigkeit ($\rho_{i F}$) sowie des gesättigten Dampfes ($\rho_{i D}$) zu [50, Gl. J1-16]:

$$Nu_{i \text{ lam l}} = 0,925 \cdot \left(\frac{1 - \frac{\rho_{i D}(T_M)}{\rho_{i F}(T_{Ri})}}{Re_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.15)$$

Für die horizontale Rohrlage gilt entsprechend [50, Gl. J1-40]:

$$Nu_{i \text{ lam h}} = 0,959 \cdot \left(\frac{1 - \frac{\rho_{i D}(T_M)}{\rho_{i F}(T_{Ri})}}{Re_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.16)$$

Im turbulenten Bereich folgt für die Nußelt-Zahl $Nu_{i \text{ turb}}$ nach [50, Gl. J1-17]:

$$Nu_{i \text{ turb}} = \frac{0,02 \cdot Re_i^{\frac{7}{24}} \cdot Pr_i^{\frac{1}{3}}}{1 + 20,52 \cdot Re_i^{-\frac{3}{8}} \cdot Pr_i^{-\frac{1}{6}}} \quad (A1.17)$$

Im Gesamtbereich kann die Nußelt-Zahl Nu_i zusammengefasst werden zu [50, Gl. J1-14/19]:

$$Nu_i = \left(f_w \cdot Nu_{i \text{ lam}}^{\frac{6}{5}} + Nu_{i \text{ turb}}^{\frac{6}{5}} \right)^{\frac{5}{6}} \cdot \left(\frac{\eta_{i D}(T_M)}{\eta_{i F}(T_{Ri})} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (A1.18)$$

Mit Hilfe der dimensionslosen Länge L' und der kinematischen Viskosität $\nu_{i F}$ der siedenden Flüssigkeit folgt [50, Gl. J1-3]:

$$L' = \left(\frac{\nu_{i F}^2(T_{Ri})}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1.19)$$

Nunmehr lässt sich der mittlere innere Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_i$ zwischen ruhendem Sattedampf und der Rohrrinnenwand bestimmen [50, Gl. J1-10]:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{Nu_i(T_M) \cdot \lambda_{i F}(T_M)}{L'} \quad (A1.20)$$

A1.3 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient bei freier Konvektion

Für den Fall einer freien Konvektion im Umfeld des Rohres kann mit Hilfe von kinematischer Viskosität ν_a , spezifischer Dichte ρ_a , spezifischer isobarer Wärmekapazität $c_{p a}$ und Wärmeleitfähigkeit λ_a von Luft bei der mittleren Temperatur $\bar{T}_{Ra U}$ ($= (T_{Ra} - T_U)/2$) zunächst die Prandtl-Zahl Pr_a berechnet werden [50, S. 754]:

$$Pr_a = \frac{\nu_a(\bar{T}_{Ra U}) \cdot \rho_a(\bar{T}_{Ra U}) \cdot c_{p a}(\bar{T}_{Ra U})}{\lambda_a(\bar{T}_{Ra U})} \quad (A1.21)$$

Für die Grashof-Zahl Gr_a folgt weiterhin [50, S. 754]:

$$Gr_a = \frac{g \cdot l_S^3 \cdot \beta_a(\bar{T}_{Ra U}) \cdot |T_{Ra} - T_U|}{\nu_a(\bar{T}_{Ra U})^2} \quad (A1.22)$$

Neben dem isobaren Wärmeausdehnungskoeffizienten β_a steht l_s für die Überströmlänge, welche von der Rohrlage abhängig ist. Für ein lotrecht betrachtetes Rohr ist die Überströmlänge l_s gleich der Rohrlänge l . Bei horizontaler Rohranordnung bestimmt sich die Überströmlänge l_s aus dem halben äußeren Rohrumfang ($l_s = (\pi \cdot d_a)/2$).

Für ein horizontales Rohr gilt für die Nußelt-Zahl $Nu_{a,h}$ entsprechend [50, Gl. F2-11]

$$Nu_{a,h} = \left(0,752 + 0,387 \cdot (Ra_a \cdot f_3(Pr_a))^{\frac{1}{6}} \right)^2 \quad (A1.23)$$

mit der Funktion $f_3(Pr_a)$ [50, Gl. F2-12]:

$$f_3(Pr_a) = \left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr_a} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{-\frac{16}{9}} \quad (A1.24)$$

Bei Anordnung eines lotrechten Rohres bestimmt sich die Nußelt-Zahl $Nu_{a,l}$ nach [50, Gl. F2-3] aus der Nußelt-Zahl Nu_p einer gleich hohen senkrechten Platte und des Verhältnisses zwischen Länge l (entspricht der Höhe) und Außendurchmesser d_a des Rohres:

$$Nu_{a,l} = Nu_p + 0,435 \cdot \frac{l}{d_a} \quad (A1.25)$$

Für die Nußelt-Zahl Nu_p folgt dabei [50, Gl. F2-1]

$$Nu_p = \left(0,825 + 0,387 \cdot (Gr_a \cdot Pr_a \cdot f_1(Pr_a))^{\frac{1}{6}} \right)^2 \quad (A1.26)$$

mit der Funktion $f_1(Pr_a)$ [50, Gl. F2-2]:

$$f_1(Pr_a) = \left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_a} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{-\frac{16}{9}} \quad (A1.27)$$

Der mittlere äußere Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_a$ zwischen Rohraußenwand und Umgebung lässt sich nunmehr zu

$$\bar{\alpha}_a = \frac{Nu_a(\bar{T}_{Ra,U}) \cdot \lambda_a(\bar{T}_{Ra,U})}{l_s} \quad (A1.28)$$

für den Fall einer freien Konvektion mit horizontal bzw. lotrecht angeordnetem Rohr bestimmen.

A1.4 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion

Zunächst kann aus den Stoffeigenschaften (kinematische Viskosität ν_a , spezifische Dichte ρ_a , spezifischer isobarer Wärmekapazität $c_{p,a}$ und Wärmeleitfähigkeit λ_a) von Luft die Prandtl-Zahl Pr_a bestimmt werden:

$$Pr_a = \frac{\nu_a(T_U) \cdot \rho_a(T_U) \cdot c_{p,a}(T_U)}{\lambda_a(T_U)} \quad (A1.29)$$

Die Gültigkeit ist dabei auf $0,6 < Pr_a \leq 1.000$ beschränkt.

Bei einem querangeströmten Rohr und der Strömungsgeschwindigkeit v_a folgt für die Reynolds-Zahl $Re_{a\,q}$ [50, S. 817]

$$Re_{a\,q} = \frac{v_a \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d_a}{v_a(T_U)} \quad (A1.30)$$

mit einer Gültigkeit im Bereich $10 < Re_{a\,q} \leq 10^7$.

Im laminaren Bereich und querangeströmten Rohr bestimmt sich die Nußelt-Zahl $Nu_{a\,lam\,q}$ zu [50, Gl. G6-4]:

$$Nu_{a\,lam\,q} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_{a\,q}} \cdot Pr_a^{\frac{1}{3}} \quad (A1.31)$$

Für den turbulenten Fall folgt die Nußelt-Zahl $Nu_{a\,turb\,q}$ mit [50, Gl. G6-5]:

$$Nu_{a\,turb\,q} = \frac{0,037 \cdot Re_{a\,q}^{0,8} \cdot Pr_a}{1 + 2,443 \cdot Re_{a\,q}^{-0,1} \cdot \left(Pr_a^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (A1.32)$$

Bei einem querangeströmten Rohr kann die Nußelt-Zahl $Nu_{a\,q}$ unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Stoffwerte zusammengefasst werden zu [50, Gl. G6-3/10]:

$$Nu_{a\,q} = \left(0,3 + \sqrt{Nu_{a\,lam\,q}^2 + Nu_{a\,turb\,q}^2} \right) \cdot \left(\frac{T_U + 273,15 \text{ °C}}{T_{Ra} + 273,15 \text{ °C}} \right)^{0,12} \quad (A1.33)$$

Daraus folgt der mittlere äußere Wärmeübergangskoeffizient $\bar{\alpha}_{a\,q}$ zwischen Rohraußenwand und Umgebung bei einem querangeströmten Rohr [50, Gl. G6-2]:

$$\bar{\alpha}_{a\,q} = \frac{Nu_{a\,q} \cdot \lambda_a(T_U)}{\frac{\pi}{2} \cdot d_a} \quad (A1.34)$$

Aus der Reynolds-Zahl $Re_{a\,p}$ für ein parallel überströmtes Rohr [50, Gl. G5-7]

$$Re_{a\,p} = \frac{v_a \cdot d_a}{v_a(T_U)} \quad (A1.35)$$

kann die Nußelt-Zahl $Nu_{a\,p}$ gemäß [50, Gl. G5-4/6, Tab. G5-2] berechnet werden zu

$$Nu_{a\,p} = 2 \cdot \frac{0,547}{\sqrt{X}} + \frac{10}{9} \cdot \frac{0,951}{X^{0,1}} \quad (A1.36)$$

mit dem Krümmungsparameter X bei Betrachtung der halben Rohrlänge l [50, Gl. G5-6]:

$$X = 4 \cdot \frac{\frac{l}{2}}{d_a \cdot Re_{a\,p}} \quad (A1.37)$$

Für den mittleren äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{\alpha}_{a\,p}$ zwischen Rohraußenwand und Umgebung bei einem parallel überströmten Rohr folgt [50, Gl. G5-5]:

$$\bar{\alpha}_{a\,p} = \frac{Nu_{a\,p} \cdot \lambda_a(T_U)}{d_a} \quad (A1.38)$$

A1.5 Berechnung der theoretischen Sattdampftemperatur

Von der internationalen Vereinigung für die Eigenschaften von Wasser und Dampf (engl.: International Association for the Properties of Water and Steam, kurz IAPWS) ist die Richtlinie IAPWS R7-97 [95] zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und absoluten Druck bekannt. In genannter Richtlinie findet sich ebenso die Beschreibung der Sattdampfkurve, s. [95, S. 33 - 35]. Für die theoretische Sattdampftemperatur $T_{\text{Dampf theo}}$ in °C gilt, in Anlehnung an [95, Gl. 31]

$$T_{\text{Dampf theo}} = \left(\frac{n_{10} + D - \sqrt{(n_{10} + D)^2 - 4 \cdot (n_9 + n_{10} \cdot D)}}{2} - 273,15 \right) \cdot 1 \text{ °C} \quad (\text{A1.39})$$

mit:

$$D = \frac{2 \cdot G}{-F - \sqrt{F^2 - 4 \cdot E \cdot G}} \quad (\text{A1.40})$$

$$E = \beta^2 + n_3 \cdot \beta + n_6 \quad (\text{A1.41})$$

$$F = n_1 \cdot \beta^2 + n_4 \cdot \beta + n_7 \quad (\text{A1.42})$$

$$G = n_2 \cdot \beta^2 + n_5 \cdot \beta + n_8 \quad (\text{A1.43})$$

Für β folgt, mit dem absoluten Druck p_{abs} in bar, nach [95, Gl. 30]:

$$\beta = (p_{\text{abs}} / 10 \text{ bar})^{\frac{1}{4}} \quad (\text{A1.44})$$

Die Koeffizienten n_i sind entsprechend [95, Tab. 34]:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0,116\,705\,214\,527\,67 \cdot 10^4 \\ n_2 &= -0,724\,213\,167\,032\,06 \cdot 10^6 \\ n_3 &= -0,170\,738\,469\,400\,92 \cdot 10^2 \\ n_4 &= 0,120\,208\,247\,024\,70 \cdot 10^5 \\ n_5 &= -0,323\,255\,503\,223\,33 \cdot 10^7 \\ n_6 &= 0,149\,151\,086\,135\,30 \cdot 10^2 \\ n_7 &= -0,482\,326\,573\,615\,91 \cdot 10^4 \\ n_8 &= 0,405\,113\,405\,420\,57 \cdot 10^6 \\ n_9 &= -0,238\,555\,575\,678\,49 \\ n_{10} &= 0,650\,175\,348\,447\,98 \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (\text{A1.45})$$

A2 Messprotokolle

A2.1 Mikroskopbilder der Prüfstrecken-Oberflächen

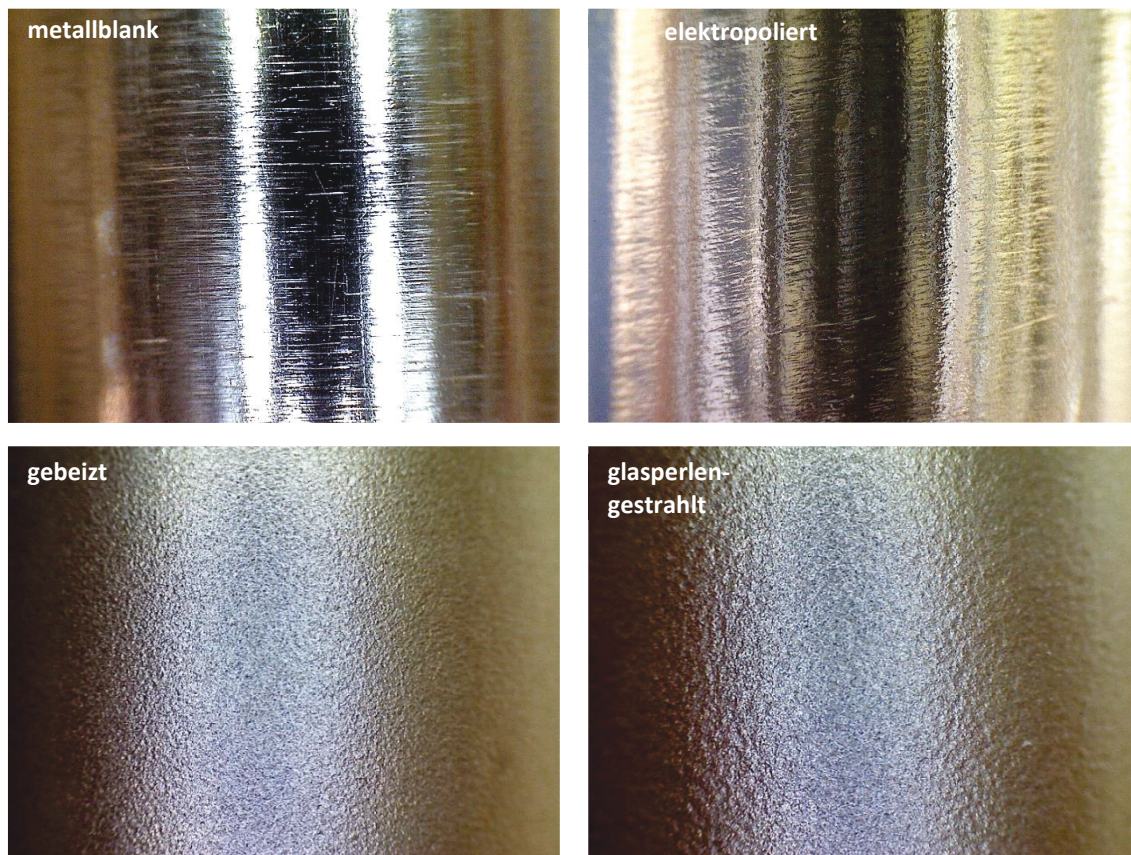


Abb. A1: Mikroskopbilder der Oberflächenbeschaffenheit der DN ½"-Prüfstrecken bei gleichem Abstand und Vergrößerungsfaktor (ca. 40 x)

A2.2 Messabweichung der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers an 3 Messpositionen sowie unterschiedlichen Solltemperaturen

Tab. A1: $\Delta T_{\text{DST}} - \text{Prüf2}$ und $\Delta T_{\text{DST}} - \text{Zul}$ der 3 Messpositionen bei unterschiedlichen Solltemperaturen

Lage DST	oben ($y = 105 \text{ mm}$)			mittig ($y = 275 \text{ mm}$)			unten ($y = 445 \text{ mm}$)		
T_{Soll} in °C	$s(T_{\text{DST}})$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Prüf2}$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Zul}$ in K	$s(T_{\text{DST}})$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Prüf2}$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Zul}$ in K	$s(T_{\text{DST}})$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Prüf2}$ in K	$\Delta T_{\text{DST}} - \text{Zul}$ in K
100	0,044	-0,043	-0,057	0,053	-0,046	-0,060	0,065	-0,040	-0,053
110	0,036	-0,039	-0,046	0,040	-0,044	-0,054	0,037	-0,034	-0,045
120	0,026	-0,033	-0,037	0,031	-0,038	-0,045	0,028	-0,029	-0,033
130	0,023	-0,025	-0,029	0,024	-0,031	-0,036	0,025	-0,022	-0,025
140	0,022	-0,016	-0,018	0,025	-0,022	-0,028	0,025	-0,012	-0,016
150	0,021	-0,003	-0,011	0,018	-0,010	-0,020	0,018	0,002	-0,008
140	0,023	-0,020	-0,025	0,024	-0,022	-0,029	0,024	-0,013	-0,017
130	0,025	-0,028	-0,034	0,024	-0,031	-0,036	0,026	-0,024	-0,027
120	0,036	-0,036	-0,040	0,029	-0,038	-0,043	0,028	-0,029	-0,035
110	0,046	-0,040	-0,046	0,041	-0,042	-0,046	0,039	-0,035	-0,040
100	0,082	-0,041	-0,048	0,056	-0,044	-0,056	0,069	-0,042	-0,050
Min.		-0,043	-0,057		-0,046	-0,060		-0,042	-0,053
Max.		-0,003	-0,011		-0,010	-0,020		0,002	-0,008

A2.3 Umgebungstemperatur im direktem Rohrumfeld

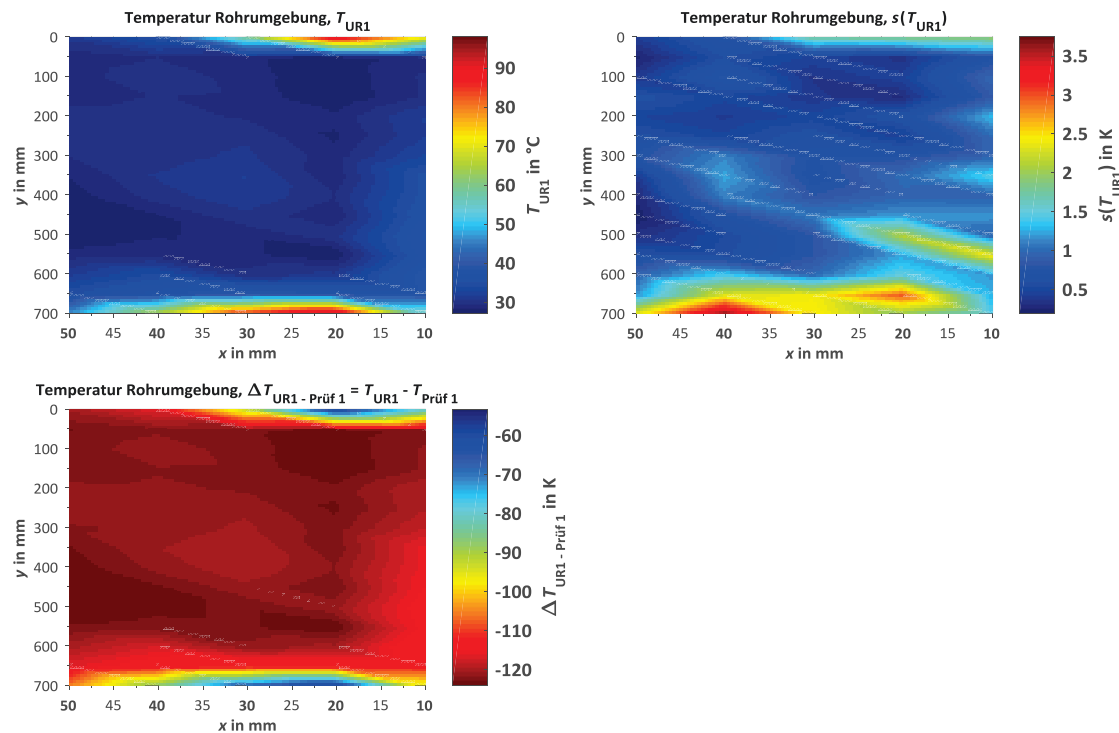


Abb. A2: Darstellungen der Umgebungstemperatur T_{UR} mit Standardabweichung $s(T_{\text{UR}})$ und Differenz zur Prüfreckentemperatur $\Delta T_{\text{UR}} - \text{Prüf 1}$

A2.4 Erzielbare Strömungsgeschwindigkeiten des Lüfters

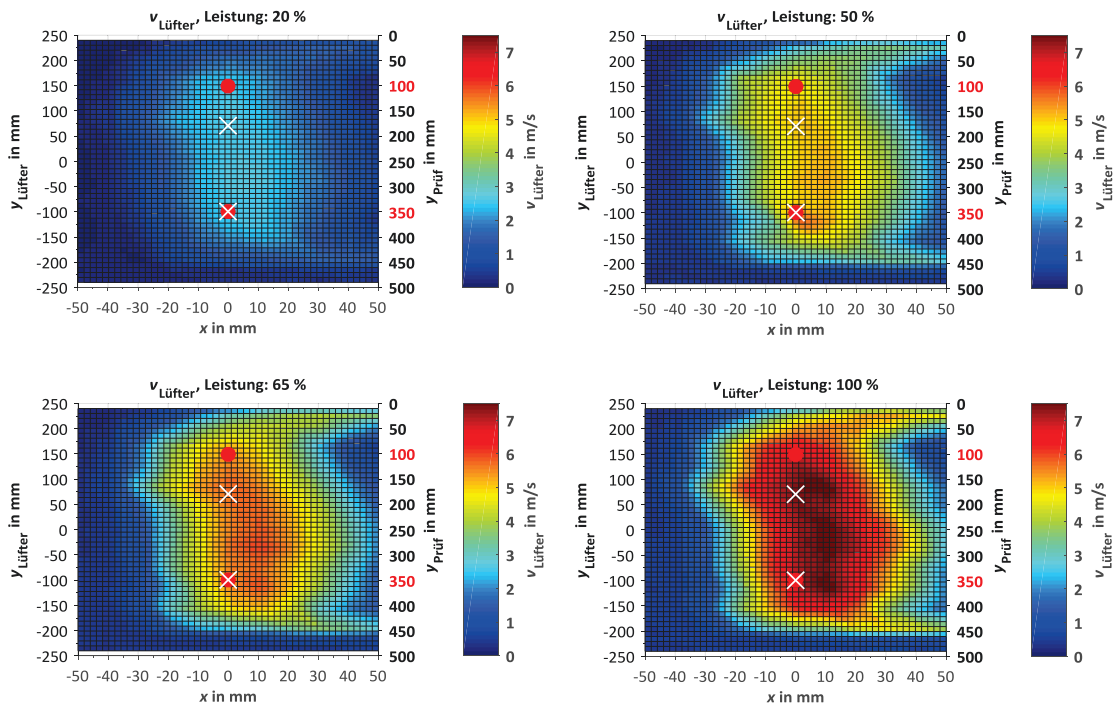


Abb. A3: Profil der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ bei verschiedenen Lüfterleistungen mit äquivalenten Messpositionen bei der gebeizten (weiß) sowie allen anderen (rot) Prüfstrecken

A2.5 Messplanstruktur

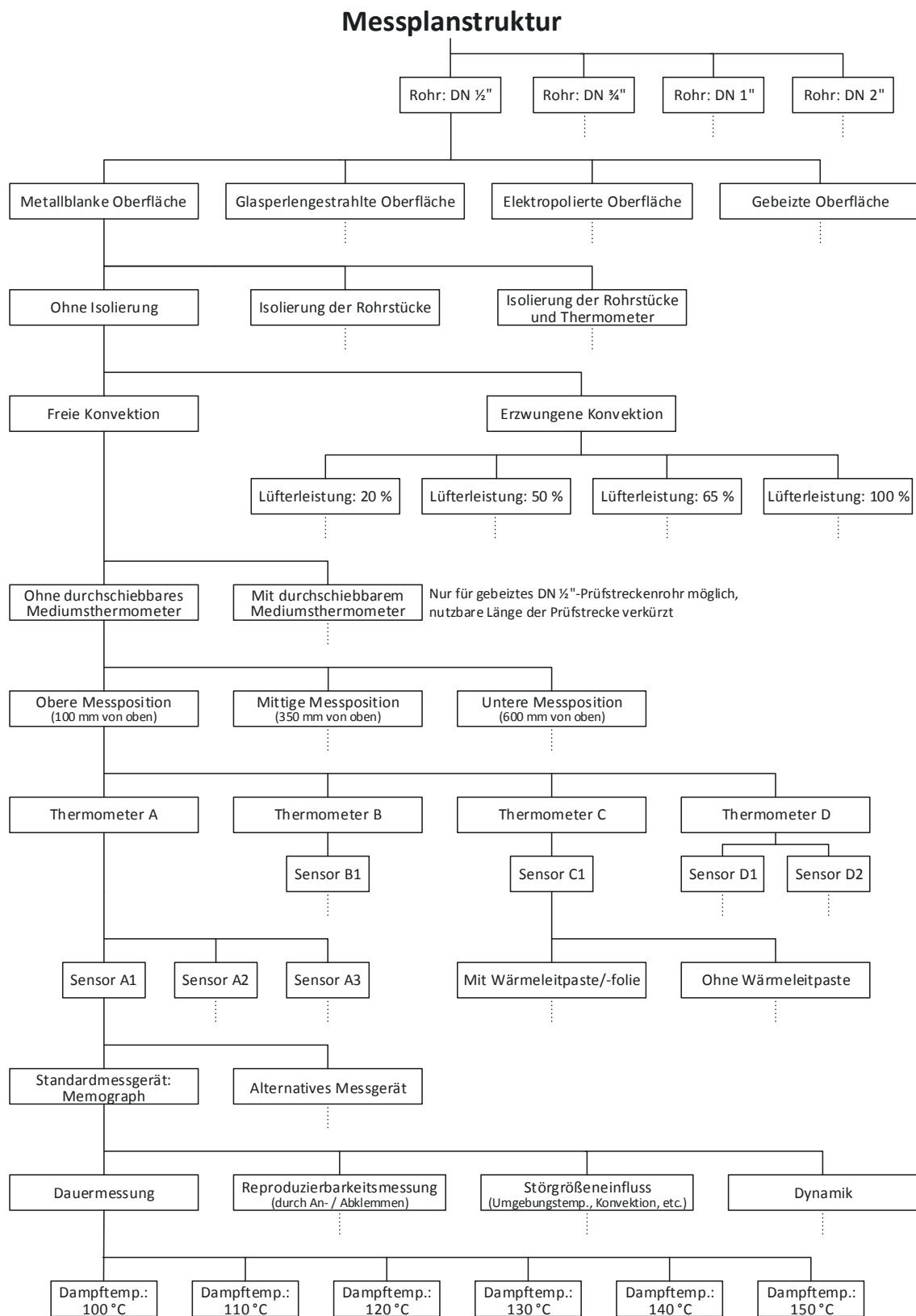


Abb. A4: Messplanstruktur mit Messmöglichkeiten der ausgewählten Rohranlegethermometer

A2.6 Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage

Tab. A2: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels A1 – 3 durch (De-) Montage am metallblanken Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 1}}$ konst. ≈ 150 °C

Thermometer	A1		A2		A3	
Messreihenr.	$\Delta T_{A1} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{A1} - \text{Prüf 1})$ in K	$\Delta T_{A2} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{A2} - \text{Prüf 1})$ in K	$\Delta T_{A3} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{A3} - \text{Prüf 1})$ in K
1	-4,603	0,030	-9,640	0,055	-6,022	0,045
2	-5,174	0,033	-10,346	0,060	-10,495	0,050
3	-4,975	0,031	-9,580	0,052	-9,236	0,073
4	-5,115	0,038	-9,761	0,075	-11,318	0,109
5	-5,143	0,040	-10,075	0,060	-10,098	0,080
6	-5,098	0,045	-9,766	0,062	-8,755	0,059
7	-5,166	0,034	-9,331	0,072	-9,364	0,071
8	-5,210	0,038	-9,373	0,075	-9,190	0,131
9	-5,190	0,038	-9,243	0,056	-9,077	0,064
10	-5,433	0,031	-9,123	0,050	-8,580	0,059
11	-5,418	0,031	-9,242	0,057	-9,089	0,074
12	-5,417	0,031	-9,243	0,057	-9,089	0,075
13	-5,490	0,034	-9,564	0,054	-9,451	0,045
14	-5,455	0,032	-9,182	0,061	-9,113	0,068
15	-5,487	0,026	-9,480	0,057	-9,182	0,045
16	-5,110	0,035	-10,856	0,067	-9,787	0,066
17	-4,870	0,030	-9,838	0,063	-9,451	0,059
18	-4,896	0,032	-10,118	0,053	-10,083	0,060
19	-5,089	0,032	-10,249	0,064	-7,489	0,064
20	-5,103	0,033	-9,893	0,064	-8,475	0,060
21	-5,493	0,038	-9,373	0,109	-9,373	0,109
Mittelwert	-5,187	0,034	-9,680	0,063	-9,177	0,070
Streuung s_x	0,237		0,452		1,060	

Tab. A3: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels A1 – 3 durch (De-) Montage am glasperlengestrahnten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 3}} \approx 150$ °C

(De-) Montage nach dem Abkühlen der Prüfstrecke auf annähernd Umgebungstemperatur						
Thermometer	A1		A2		A3	
Messreihenr.	$\Delta T_{A1} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A1} - \text{Prüf 3})$ in K	$\Delta T_{A2} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A2} - \text{Prüf 3})$ in K	$\Delta T_{A3} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A3} - \text{Prüf 3})$ in K
1	-4,837	0,079	-10,478	0,057	-10,382	0,092
2	-4,806	0,068	-10,588	0,071	-11,072	0,067
3	-4,720	0,050	-10,305	0,042	-11,099	0,053
4	-4,730	0,048	-10,392	0,046	-9,202	0,046
5	-4,941	0,095	-10,067	0,102	-11,094	0,091
Mittelwert	-4,807	0,068	-10,366	0,064	-10,570	0,070
Streuung s_x	0,090		0,197		0,824	

(De-) Montage bei konstanter Temperierung der Prüfstrecke auf $\approx 150\text{ °C}$						
Thermometer	A1		A2		A3	
Messreihenr.	ΔT_{A1} - Prüf 3 in K	$s(\Delta T_{A1}$ - Prüf 3) in K	ΔT_{A2} - Prüf 3 in K	$s(\Delta T_{A2}$ - Prüf 3) in K	ΔT_{A3} - Prüf 3 in K	$s(\Delta T_{A3}$ - Prüf 3) in K
6	-4,156	0,072	-7,852	0,072	-9,089	0,157
7	-4,108	0,077	-7,314	0,079	-9,340	0,070
8	-4,071	0,072	-7,446	0,060	-9,267	0,129
9	-4,049	0,065	-7,442	0,060	-9,224	0,126
10	-4,061	0,075	-8,541	0,078	-9,569	0,089
11	-3,931	0,068	-7,111	0,051	-7,931	0,055
12	-3,977	0,048	-7,045	0,060	-8,408	0,085
13	-3,965	0,042	-6,792	0,043	-8,586	0,056
14	-4,052	0,037	-6,976	0,033	-8,724	0,100
15	-4,061	0,073	-6,930	0,115	-8,825	0,241
16	-3,805	0,038	-7,133	0,035	-	-
17	-3,978	0,044	-7,731	0,042	-8,122	0,071
18	-4,062	0,046	-8,343	0,076	-8,468	0,085
Mittelwert	-4,021	0,058	-7,435	0,062	-8,796	0,105
Streuung s_x	0,090		0,544		0,513	

Tab. A4: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels B1 und C1 durch (De-) Montage am gebeizten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 2}}$ konst. $\approx 150\text{ °C}$, Position des DST im Bereich von B1

Thermometer	B1			C1		
Messreihenr.	ΔT_{B1} - Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{B1}$ - Prüf 2) in K	ΔT_{B1} - DST in K	$s(\Delta T_{B1}$ - DST) in K	ΔT_{C1} - Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{C1}$ - Prüf 2) in K
1	-3,058	0,088	-3,048	0,087	-2,062	0,076
2	-3,099	0,088	-3,088	0,087	-2,348	0,077
3	-2,871	0,084	-2,860	0,083	-2,211	0,067
4	-2,748	0,094	-2,737	0,091	-1,984	0,083
5	-2,654	0,093	-2,643	0,090	-2,000	0,078
6	-3,319	0,092	-3,308	0,090	-2,086	0,081
7	-2,739	0,091	-2,726	0,089	-1,922	0,076
8	-3,002	0,090	-2,989	0,089	-2,500	0,079
9	-2,659	0,095	-2,645	0,093	-1,995	0,080
10	-2,765	0,089	-2,751	0,089	-1,897	0,074
Mittelwert	-2,891	0,090	-2,880	0,089	-2,101	0,077
Streuung s_x	0,220		0,221		0,195	

Tab. A5: Reproduzierbarkeit der Temperaturmessung mittels D1 – 2 durch (De-) Montage am gebeizten Prüfstreckenrohr, $T_{\text{Prüf 2}} \text{ konst. } \approx 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Position des DST im Bereich von D2

Thermometer	D1		D2			
Messreihenr.	$\Delta T_{D1 - \text{Prüf 2}}$ in K	$s(\Delta T_{D1 - \text{Prüf 2}})$ in K	$\Delta T_{D2 - \text{Prüf 2}}$ in K	$s(\Delta T_{D2 - \text{Prüf 2}})$ in K	$\Delta T_{D2 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{D2 - \text{DST}})$ in K
1	-3,668	0,091	-2,500	0,079	-2,496	0,082
2	-3,109	0,097	-2,615	0,081	-2,612	0,082
3	-3,770	0,092	-2,873	0,075	-2,869	0,076
4	-3,563	0,092	-3,486	0,083	-3,483	0,086
5	-3,929	0,093	-2,930	0,077	-2,926	0,080
6	-2,715	0,102	-2,515	0,092	-2,507	0,083
7	-3,122	0,097	-2,220	0,077	-2,215	0,081
8	-2,813	0,098	-2,407	0,077	-2,403	0,079
9	-2,660	0,097	-2,425	0,078	-2,420	0,080
10	-2,883	0,098	-2,373	0,080	-2,370	0,082
11	-2,639	0,099	-2,530	0,080	-2,527	0,081
12	-3,429	0,094	-2,421	0,080	-2,418	0,082
13	-3,945	0,093	-2,902	0,082	-2,898	0,083
14	-3,662	0,098	-2,925	0,079	-2,921	0,081
15	-3,611	0,099	-2,342	0,076	-2,337	0,079
Mittelwert	-3,301	0,096	-2,631	0,08	-2,627	0,081
Streuung s_x	0,474		0,331		0,332	

A2.7 Messabweichung von der Mediumstemperatur

Tab. A6: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 – 3 von der Prüfstreckentemperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am metallblanken Prüfstreckenrohr

Thermometer	A1		A2		A3	
T_{Soll} in $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{A1 - \text{Prüf 1}}$ in K	$s(\Delta T_{A1 - \text{Prüf 1}})$ in K	$\Delta T_{A2 - \text{Prüf 1}}$ in K	$s(\Delta T_{A2 - \text{Prüf 1}})$ in K	$\Delta T_{A3 - \text{Prüf 1}}$ in K	$s(\Delta T_{A3 - \text{Prüf 1}})$ in K
100	-3,320	0,056	-2,997	0,068	-2,692	0,067
110	-3,696	0,043	-3,336	0,044	-3,009	0,036
120	-4,147	0,051	-3,781	0,043	-3,488	0,057
130	-4,526	0,033	-4,175	0,036	-4,003	0,041
140	-4,977	0,032	-4,550	0,040	-4,520	0,046
150	-5,236	0,021	-4,714	0,037	-4,787	0,041
140	-4,951	0,030	-4,470	0,037	-4,431	0,041
130	-4,382	0,025	-4,116	0,039	-3,750	0,048
120	-3,936	0,033	-3,658	0,042	-3,215	0,038
110	-3,489	0,038	-3,190	0,044	-2,758	0,040
100	-3,116	0,040	-2,840	0,047	-2,467	0,042
Mittelwert		0,037		0,043		0,045
Minimum	-5,2	0,021	-4,7	0,036	-4,8	0,036
Maximum	-3,1	0,056	-2,8	0,068	-2,5	0,067

Tab. A7: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 – 3 von der Prüfstreckentemperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am glasperlengestrahnten Prüfstreckenrohr

Thermometer	A1		A2		A3	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{A1} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A1} - \text{Prüf 3})$ in K	$\Delta T_{A2} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A2} - \text{Prüf 3})$ in K	$\Delta T_{A3} - \text{Prüf 3}$ in K	$s(\Delta T_{A3} - \text{Prüf 3})$ in K
100	-2,252	0,035	-4,274	0,054	-4,902	0,073
110	-2,616	0,027	-4,979	0,059	-5,477	0,123
120	-2,978	0,026	-5,645	0,040	-6,324	0,090
130	-3,351	0,030	-6,309	0,057	-7,172	0,081
140	-3,726	0,027	-7,006	0,061	-7,902	0,087
150	-4,118	0,019	-7,843	0,039	-8,720	0,049
Mittelwert		0,027		0,052		0,084
Minimum	-4,1	0,019	-7,8	0,039	-8,7	0,049
Maximum	-2,3	0,035	-4,3	0,061	-4,9	0,123

Tab. A8: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Prüfstrecken-temperatur bei verschiedenen Solltemperaturen am metallblanken Prüfstreckenrohr

Thermometer	A1		B1		C1	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{A1} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{A1} - \text{Prüf 1})$ in K	$\Delta T_{B1} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{B1} - \text{Prüf 1})$ in K	$\Delta T_{C1} - \text{Prüf 1}$ in K	$s(\Delta T_{C1} - \text{Prüf 1})$ in K
100	-4,003	0,032	-1,465	0,020	-1,329	0,015
110	-4,462	0,031	-1,657	0,020	-1,484	0,017
120	-4,893	0,027	-1,817	0,022	-1,530	0,020
130	-5,485	0,026	-1,960	0,024	-1,737	0,023
140	-6,070	0,086	-2,153	0,028	-1,826	0,032
150	-6,478	0,040	-2,253	0,028	-1,955	0,029
140	-5,939	0,027	-2,072	0,023	-1,845	0,024
130	-5,307	0,024	-1,904	0,025	-1,678	0,023
120	-4,747	0,025	-1,740	0,022	-1,507	0,018
110	-4,261	0,032	-1,543	0,021	-1,340	0,025
100	-3,783	0,030	-1,359	0,019	-1,194	0,016
Mittelwert		0,035		0,023		0,022
Minimum	-6,5	0,024	-2,3	0,019	-2,0	0,015
Maximum	-3,8	0,086	-1,4	0,028	-1,2	0,029

Tab. A9: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Prüfstreckentemperatur bzw. der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers im jeweiligen Bereich bei verschiedenen Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr

Thermo- meter	A1			B1			C1		
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{A1} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{A1} -$ Prüf 2) in K	$\Delta T_{A1} - \text{DST}$ in K	$\Delta T_{B1} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{B1} -$ Prüf 2) in K	$\Delta T_{B1} - \text{DST}$ in K	$\Delta T_{C1} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{C1} -$ Prüf 2) in K	$\Delta T_{C1} - \text{DST}$ in K
100	-2,874	0,063	-2,830	-1,409	0,062	-1,364	-1,090	0,053	-1,050
110	-3,065	0,071	-3,026	-1,650	0,066	-1,606	-1,266	0,057	-1,232
120	-3,465	0,050	-3,432	-1,780	0,073	-1,743	-1,388	0,064	-1,359
130	-3,945	0,054	-3,920	-2,089	0,080	-2,058	-1,658	0,075	-1,636
140	-4,432	0,055	-4,416	-2,249	0,085	-2,227	-1,831	0,080	-1,818
150	-5,017	0,070	-5,014	-2,430	0,091	-2,420	-1,967	0,084	-1,969
140	-4,556	0,064	-4,537	-2,193	0,083	-2,170	-1,786	0,078	-1,774
130	-3,977	0,057	-3,948	-1,990	0,079	-1,959	-1,609	0,074	-1,585
120	-3,467	0,059	-3,431	-1,750	0,070	-1,712	-1,358	0,086	-1,330
110	-2,774	0,054	-2,735	-1,503	0,063	-1,460	-1,147	0,056	-1,112
100	-2,597	0,066	-2,556	-1,363	0,058	-1,319	-1,015	0,057	-0,973
MW		0,060			0,074			0,069	
Min.	-5,0	0,050	-5,0	-2,4	0,058	-2,4	-2,0	0,053	-2,0
Max.	-2,6	0,071	-2,6	-1,4	0,091	-1,3	-1,0	0,086	-1,0

Tab. A10: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Prüfstreckentemperatur bzw. der Temperatur des durchschiebbaren Thermometers im jeweiligen Bereich bei verschiedenen Solltemperaturen am gebeizten Prüfstreckenrohr

Thermometer	D1		D2		C1		
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{D1} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{D1} -$ Prüf 2) in K	$\Delta T_{D2} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{D2} -$ Prüf 2) in K	$\Delta T_{D2} - \text{DST}$ in K	$\Delta T_{C1} -$ Prüf 2 in K	$s(\Delta T_{C1} -$ Prüf 2) in K
100	-2,732	0,072	-1,694	0,080	-1,659	-1,161	0,076
110	-3,068	0,073	-1,940	0,070	-1,908	-1,301	0,075
120	-3,505	0,077	-2,289	0,078	-2,261	-1,457	0,068
130	-3,821	0,085	-2,513	0,087	-2,492	-1,597	0,072
140	-4,094	0,086	-2,889	0,085	-2,879	-1,823	0,075
150	-4,504	0,084	-3,078	0,083	-3,080	-1,982	0,071
140	-3,972	0,076	-2,735	0,082	-2,725	-1,772	0,071
130	-3,412	0,074	-2,431	0,076	-2,409	-1,600	0,067
120	-3,025	0,073	-2,128	0,076	-2,098	-1,342	0,065
110	-2,595	0,069	-1,821	0,075	-1,788	-1,164	0,062
100	-2,283	0,065	-1,541	0,070	-1,504	-1,036	0,060
Mittelwert		0,076		0,078			0,069
Minimum	-2,3	0,065	-1,5	0,070	-1,5	-1,0	0,060
Maximum	-4,5	0,086	-3,1	0,087	-3,1	-2,0	0,076

A2.8 Einfluss von erzwungener Konvektion

Tab. A11: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20	50	65	100				
$v_{\text{Lüfter}}$ in m/s	0	2,6	5,0	5,7	7,3				
T_{Soll} in °C	ΔT_{A1} - Prüf 2 in K	ΔT_{A1} - Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	ΔT_{A1} - Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	ΔT_{A1} - Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	ΔT_{A1} - Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K
100	-2,874	-4,804	-1,930	-5,472	-2,598	-5,589	-2,715	-5,867	-2,993
110	-3,065	-5,511	-2,446	-6,178	-3,113	-6,315	-3,250	-6,635	-3,570
120	-3,465	-6,312	-2,847	-7,004	-3,539	-7,163	-3,698	-7,474	-4,009
130	-3,945	-7,085	-3,140	-7,837	-3,892	-7,979	-4,034	-8,347	-4,402
140	-4,432	-7,876	-3,444	-8,680	-4,248	-8,819	-4,387	-9,211	-4,779
150	-5,017	-8,602	-3,585	-9,525	-4,508	-9,677	-4,660	-10,073	-5,056
140	-4,556	-7,692	-3,136	-8,587	-4,031	-8,744	-4,188	-9,161	-4,605
130	-3,977	-6,918	-2,941	-7,746	-3,769	-7,900	-3,923	-8,300	-4,323
120	-3,467	-6,130	-2,663	-6,949	-3,482	-7,091	-3,624	-7,446	-3,979
110	-2,774	-5,365	-2,591	-6,141	-3,367	-6,260	-3,486	-6,561	-3,787
100	-2,597	-4,737	-2,140	-5,437	-2,840	-5,545	-2,948	-5,822	-3,225
Min.	-5,0	-8,6	-3,6	-9,5	-4,5	-9,7	-4,7	-10,1	-5,1
Max.	-2,6	-4,7	-1,9	-5,4	-2,6	-5,5	-2,7	-5,8	-3,0

Tab. A12: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20	50	65	100				
$v_{\text{Lüfter}}$ in m/s	0	2,5	5,3	5,5	7,0				
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{\text{B1}} -$ Prüf 2 in K	$\Delta T_{\text{B1}} -$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} -$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} -$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} -$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K
100	-1,409	-1,880	-0,471	-2,098	-0,689	-2,155	-0,746	-2,287	-0,878
110	-1,650	-2,128	-0,478	-2,365	-0,715	-2,437	-0,787	-2,589	-0,939
120	-1,780	-2,395	-0,615	-2,671	-0,891	-2,756	-0,976	-2,912	-1,132
130	-2,089	-2,648	-0,559	-2,964	-0,875	-3,049	-0,960	-3,235	-1,146
140	-2,249	-2,922	-0,673	-3,248	-0,999	-3,332	-1,083	-3,539	-1,290
150	-2,430	-3,163	-0,733	-3,527	-1,097	-3,611	-1,181	-3,832	-1,402
140	-2,193	-2,899	-0,706	-3,241	-1,048	-3,319	-1,126	-3,530	-1,337
130	-1,990	-2,646	-0,656	-2,953	-0,963	-3,026	-1,036	-3,222	-1,232
120	-1,750	-2,378	-0,628	-2,694	-0,944	-2,748	-0,998	-2,921	-1,171
110	-1,503	-2,089	-0,586	-2,362	-0,859	-2,420	-0,917	-2,565	-1,062
100	-1,363	-1,849	-0,486	-2,088	-0,725	-2,140	-0,777	-2,264	-0,901
Min.	-2,4	-3,2	-0,7	-3,5	-1,1	-3,6	-1,2	-3,8	-0,9
Max.	-1,4	-1,8	-0,5	-2,1	-0,7	-2,1	-0,7	-2,3	-1,4

Tab. A13: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1 von der Prüfstreckentemperatur an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20		50		65		100	
V _{Lüfter} in m/s	0	2,5		5,3		5,5		7,0	
T _{Soll} in °C	ΔT _{C1} - Prüf 2 in K	ΔT _{C1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{C1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{C1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{C1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K
100	-1,161	-2,213	-1,052	-2,648	-1,487	-2,743	-1,582	-2,870	-1,709
110	-1,301	-2,478	-1,177	-2,984	-1,683	-3,088	-1,787	-3,253	-1,952
120	-1,457	-2,801	-1,344	-3,356	-1,899	-3,497	-2,040	-3,675	-2,218
130	-1,597	-3,103	-1,506	-3,734	-2,137	-3,871	-2,274	-4,086	-2,489
140	-1,823	-3,377	-1,554	-4,072	-2,249	-4,229	-2,406	-4,475	-2,652
150	-1,982	-3,633	-1,651	-4,410	-2,428	-4,591	-2,609	-4,848	-2,866
140	-1,772	-3,376	-1,604	-4,063	-2,291	-4,224	-2,452	-4,485	-2,713
130	-1,600	-3,107	-1,507	-3,713	-2,113	-3,871	-2,271	-4,119	-2,519
120	-1,342	-2,821	-1,479	-3,384	-2,042	-3,501	-2,159	-3,815	-2,473
110	-1,164	-2,496	-1,332	-2,983	-1,819	-3,038	-1,874	-3,294	-2,130
100	-1,036	-2,209	-1,173	-2,653	-1,617	-2,686	-1,650	-2,933	-1,897
Min.	-1,0	-3,6	-1,7	-4,4	-2,4	-4,6	-2,6	-4,8	-2,9
Max.	-2,0	-2,2	-1,1	-2,6	-1,5	-2,7	-1,6	-2,9	-1,7

Tab. A14: Messabweichung der Temperaturmessung mit D1 von der Prüfstreckentemperatur an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20	50	65	100				
V _{Lüfter} in m/s	0	2,6	5,0	5,7	7,3				
T _{Soll} in °C	ΔT _{D1} - Prüf 2 in K	ΔT _{D1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{D1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{D1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{D1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K
100	-2,732	-3,539	-0,807	-3,888	-1,156	-3,902	-1,170	-3,917	-1,185
110	-3,068	-3,995	-0,927	-4,393	-1,325	-4,393	-1,325	-4,350	-1,282
120	-3,505	-4,541	-1,036	-4,959	-1,454	-4,963	-1,458	-4,938	-1,433
130	-3,821	-5,130	-1,309	-5,526	-1,705	-5,517	-1,696	-5,530	-1,709
140	-4,094	-5,710	-1,616	-6,095	-2,001	-6,088	-1,994	-6,123	-2,029
150	-4,504	-6,234	-1,730	-6,647	-2,143	-6,653	-2,149	-6,705	-2,201
140	-3,972	-5,731	-1,759	-6,122	-2,150	-6,125	-2,153	-6,180	-2,208
130	-3,412	-5,206	-1,794	-5,528	-2,116	-5,548	-2,136	-5,584	-2,172
120	-3,025	-4,636	-1,611	-4,963	-1,938	-4,939	-1,914	-5,008	-1,983
110	-2,595	-4,097	-1,502	-4,374	-1,779	-4,323	-1,728	-4,390	-1,795
100	-2,283	-3,596	-1,313	-3,862	-1,579	-3,834	-1,551	-3,903	-1,620
Min.	-4,5	-6,2	-0,8	-6,6	-2,1	-6,7	-2,2	-6,7	-2,2
Max.	-2,3	-3,5	-1,7	-3,9	-1,6	-3,8	-1,2	-3,9	-1,2

A2.9 Einfluss von Isolierung

Tab. A15: Vergleich der Messabweichungen der Temperaturmessung mit A1, B1, C1 und D1 ohne sowie mit vollständiger Isolierung in Abhängigkeit von der Solltemperatur

Thermo- meter	A1		B1		C1		D1	
Isolierung	ohne	vollstän.	ohne	vollstän.	ohne	vollstän.	ohne	vollstän.
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K		$\Delta T_{\text{B1 - Prüf 2}}$ in K		$\Delta T_{\text{C1 - Prüf 2}}$ in K		$\Delta T_{\text{D1 - Prüf 2}}$ in K	
100	-2,874	-1,440	-1,409	-1,306	-1,090	-0,703	-2,732	-1,413
110	-3,065	-1,706	-1,650	-1,467	-1,266	-0,795	-3,068	-1,620
120	-3,465	-2,032	-1,780	-1,701	-1,388	-0,927	-3,505	-1,852
130	-3,945	-2,296	-2,089	-1,896	-1,658	-1,033	-3,821	-2,050
140	-4,432	-2,534	-2,249	-2,115	-1,831	-1,147	-4,094	-2,252
150	-5,017	-2,763	-2,430	-2,346	-1,967	-1,264	-4,504	-2,450

Tab. A16: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der umgebenden Rohrstücke an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20	50	65	100				
vLüfter in m/s	0	2,6	5,0	5,7	7,3				
T _{Soll} in °C	ΔT _{A1} - Prüf 2 in K	ΔT _{A1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{A1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{A1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{A1} - Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K
100	-2,187	-2,942	-0,755	-3,413	-1,226	-3,519	-1,332	-3,814	-1,627
110	-2,539	-3,398	-0,859	-3,869	-1,330	-3,995	-1,456	-4,339	-1,800
120	-2,975	-3,911	-0,936	-4,395	-1,420	-4,532	-1,557	-4,896	-1,921
130	-3,414	-4,452	-1,038	-4,937	-1,523	-5,084	-1,670	-5,466	-2,052
140	-3,868	-4,938	-1,070	-5,479	-1,611	-5,626	-1,758	-6,009	-2,141
150	-4,330	-5,434	-1,104	-6,052	-1,722	-6,200	-1,870	-6,577	-2,247
140	-3,811	-4,869	-1,058	-5,387	-1,576	-5,545	-1,734	-5,948	-2,137
130	-3,329	-4,294	-0,965	-4,831	-1,502	-4,996	-1,667	-5,418	-2,089
120	-2,891	-3,806	-0,915	-4,328	-1,437	-4,500	-1,609	-4,843	-1,952
110	-2,470	-3,312	-0,842	-3,849	-1,379	-3,996	-1,526	-4,354	-1,884
100	-2,094	-2,906	-0,812	-3,375	-1,281	-3,494	-1,400	-3,809	-1,715
Min.	-4,3	-5,4	-1,1	-6,1	-1,7	-6,2	-1,9	-6,6	-2,2
Max.	-2,1	-2,9	-0,8	-3,4	-1,2	-3,5	-1,3	-3,8	-1,6

Tab. A17: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur mit Isolierung der umgebenden Rohrstücke an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20		50		65		100	
$v_{\text{Lüfter}}$ in m/s	0	2,5		5,3		5,5		7,0	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{\text{B1}} \cdot$ Prüf 2 in K	$\Delta T_{\text{B1}} \cdot$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} \cdot$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} \cdot$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K	$\Delta T_{\text{B1}} \cdot$ Prüf 2 in K	$\Delta T((v = 0)$ = 0) in K
100	-1,338	-1,669	-0,331	-1,849	-0,511	-1,892	-0,554	-2,003	-0,665
110	-1,530	-1,894	-0,364	-2,089	-0,559	-2,123	-0,593	-2,259	-0,729
120	-1,760	-2,136	-0,376	-2,348	-0,588	-2,387	-0,627	-2,527	-0,767
130	-1,999	-2,388	-0,389	-2,616	-0,617	-2,657	-0,658	-2,807	-0,808
140	-2,222	-2,623	-0,401	-2,859	-0,637	-2,904	-0,682	-3,063	-0,841
150	-2,447	-2,862	-0,415	-3,099	-0,652	-3,164	-0,717	-3,325	-0,878
140	-2,231	-2,619	-0,388	-2,848	-0,617	-2,915	-0,684	-3,066	-0,835
130	-1,997	-2,383	-0,386	-2,584	-0,587	-2,661	-0,664	-2,800	-0,803
120	-1,752	-2,147	-0,395	-2,339	-0,587	-2,392	-0,640	-2,540	-0,788
110	-1,540	-1,882	-0,342	-2,059	-0,519	-2,110	-0,570	-2,262	-0,722
100	-1,344	-1,667	-0,323	-1,832	-0,488	-1,872	-0,528	-2,011	-0,667
Min.	-2,4	-2,9	-0,4	-3,1	-0,7	-3,2	-0,7	-3,3	-0,9
Max.	-1,3	-1,7	-0,3	-1,8	-0,5	-1,9	-0,5	-2,0	-0,7

Tab. A18: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20	50	65	100				
Vlüfter in m/s	0	2,6	5,0	5,7	7,3				
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v = 0) = 0)$ in K	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v = 0) = 0)$ in K	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v = 0) = 0)$ in K	$\Delta T_{\text{A1 - Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v = 0) = 0)$ in K
100	-1,440	-1,672	-0,232	-1,764	-0,324	-1,774	-0,334	-1,822	-0,382
110	-1,706	-1,996	-0,290	-2,057	-0,351	-2,097	-0,391	-2,116	-0,410
120	-2,032	-2,354	-0,322	-2,407	-0,375	-2,433	-0,401	-2,475	-0,443
130	-2,296	-2,684	-0,388	-2,815	-0,519	-2,828	-0,532	-2,884	-0,588
140	-2,534	-3,012	-0,478	-3,115	-0,581	-3,180	-0,646	-3,226	-0,692
150	-2,763	-3,285	-0,522	-3,402	-0,639	-3,466	-0,703	-3,505	-0,742
140	-2,487	-2,979	-0,492	-3,105	-0,618	-3,145	-0,658	-3,148	-0,661
130	-2,218	-2,632	-0,414	-2,758	-0,540	-2,747	-0,529	-2,827	-0,609
120	-1,914	-2,311	-0,397	-2,399	-0,485	-2,426	-0,512	-2,456	-0,542
110	-1,618	-1,944	-0,326	-2,065	-0,447	-2,083	-0,465	-2,147	-0,529
100	-1,399	-1,675	-0,276	-1,750	-0,351	-1,762	-0,363	-1,820	-0,421
Min.	-2,8	-3,3	-0,5	-3,4	-0,6	-3,5	-0,7	-3,5	-0,7
Max.	-1,4	-1,7	-0,2	-1,8	-0,3	-1,8	-0,3	-1,8	-0,4

Tab. A19: Messabweichung der Temperaturmessung mit B1 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Lüfterl. in %	0	20		50		65		100	
vLüfter in m/s	0	2,5		5,3		5,5		7,0	
T _{Soll} in °C	ΔT _{B1} -Prüf 2 in K	ΔT _{B1} -Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{B1} -Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{B1} -Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K	ΔT _{B1} -Prüf 2 in K	ΔT((v = 0) = 0) in K
100	-1,306	-1,603	-0,297	-1,695	-0,389	-1,699	-0,393	-1,735	-0,429
110	-1,467	-1,836	-0,369	-1,901	-0,434	-1,936	-0,469	-1,935	-0,468
120	-1,701	-2,087	-0,386	-2,152	-0,451	-2,175	-0,474	-2,205	-0,504
130	-1,896	-2,295	-0,399	-2,425	-0,529	-2,438	-0,542	-2,476	-0,580
140	-2,115	-2,534	-0,419	-2,637	-0,522	-2,677	-0,562	-2,703	-0,588
150	-2,346	-2,769	-0,423	-2,871	-0,525	-2,900	-0,554	-2,934	-0,588
140	-2,139	-2,538	-0,399	-2,646	-0,507	-2,678	-0,539	-2,677	-0,538
130	-1,928	-2,289	-0,361	-2,399	-0,471	-2,402	-0,474	-2,444	-0,516
120	-1,725	-2,076	-0,351	-2,159	-0,434	-2,186	-0,461	-2,190	-0,465
110	-1,510	-1,801	-0,291	-1,898	-0,388	-1,923	-0,413	-1,954	-0,444
100	-1,333	-1,604	-0,271	-1,678	-0,345	-1,696	-0,363	-1,723	-0,390
Min.	-2,3	-2,8	-0,4	-2,9	-0,5	-2,9	-0,6	-2,9	-0,6
Max.	-1,3	-1,6	-0,3	-1,7	-0,3	-1,7	-0,4	-1,7	-0,4

Tab. A20: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Prüfstreckentemperatur mit vollständiger Isolierung an der geheizten Prüfstrecke in Abhängigkeit von Solltemperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Thermometer	D1			C1			D2		
Lüfterl. in %	0	100		0	100		0	100	
$v_{\text{Lüfter}}$ in m/s	0	7,3		0	7,0		0	(0,5)	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v=0)=0)$ in K	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v=0)=0)$ in K	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T_{\text{D1-Prüf 2}}$ in K	$\Delta T((v=0)=0)$ in K
100	-1,413	-1,934	-0,521	-0,613	-0,700	-0,087	-1,120	-1,387	-0,267
110	-1,620	-2,226	-0,606	-0,708	-0,828	-0,120	-1,264	-1,561	-0,297
120	-1,852	-2,553	-0,701	-0,803	-0,969	-0,166	-1,421	-1,764	-0,343
130	-2,050	-2,875	-0,825	-0,894	-1,081	-0,187	-1,582	-1,948	-0,366
140	-2,252	-3,156	-0,904	-0,996	-1,163	-0,167	-1,758	-2,130	-0,372
150	-2,450	-3,451	-1,001	-1,090	-1,269	-0,179	-1,922	-2,323	-0,401
140	-2,242	-3,164	-0,922	-0,995	-1,173	-0,178	-1,763	-2,124	-0,361
130	-2,037	-2,885	-0,848	-0,892	-1,095	-0,203	-1,586	-1,976	-0,390
120	-1,826	-2,553	-0,727	-0,807	-0,950	-0,143	-1,448	-1,735	-0,287
110	-1,586	-2,244	-0,658	-0,698	-0,823	-0,125	-1,256	-1,550	-0,294
100	-1,395	-1,957	-0,562	-0,608	-0,729	-0,121	-1,108	-1,411	-0,303
Minimum	-2,5	-3,5	-1,0	-1,1	-1,3	-0,2	-1,9	-2,3	-0,4
Maximum	-1,4	-1,9	-0,5	-0,6	-0,7	-0,1	-1,1	-1,4	-0,3

A2.10 Vergleich mit Messungen am Sattdampf-Prüfstand

Tab. A21: Messabweichung der Temperaturmessung mit A1, B1 und C1 von der Temperatur des, mittig positionierten, durchschiebbaren Thermometers bei vers. Solltemperaturen am geheizten Prüfstreckenrohr

Thermometer	A1		B1		C1	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{A1 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{A1 - \text{DST}})$ in K	$\Delta T_{B1 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{B1 - \text{DST}})$ in K	$\Delta T_{C1 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{C1 - \text{DST}})$ in K
100	-2,478	0,056	-1,558	0,063	-1,023	0,054
110	-2,803	0,065	-1,760	0,072	-1,213	0,058
120	-3,227	0,068	-2,027	0,080	-1,416	0,065
130	-3,686	0,068	-2,325	0,084	-1,665	0,068
140	-4,264	0,075	-2,657	0,086	-1,833	0,067
150	-4,778	0,074	-2,941	0,083	-1,963	0,065
Mittelwert		0,068		0,078		0,063
Minimum	-4,8	0,056	-2,9	0,063	-2,0	0,054
Maximum	-2,5	0,075	-1,6	0,086	-1,0	0,067

Tab. A22: Messabweichung der Temperaturmessung mit C1, D1 und D2 von der Temperatur des, mittig positionierten, durchschiebbaren Thermometers bei vers. Solltemperaturen am geheizten Prüfstreckenrohr

Thermometer	D1		C1		D2	
T_{Soll} in °C	$\Delta T_{D1 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{D1 - \text{DST}})$ in K	$\Delta T_{C1 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{C1 - \text{DST}})$ in K	$\Delta T_{D2 - \text{DST}}$ in K	$s(\Delta T_{D2 - \text{DST}})$ in K
100	-1,599	0,037	-1,247	0,039	-1,525	0,031
110	-1,813	0,045	-1,500	0,047	-1,711	0,036
120	-1,951	0,080	-1,554	0,085	-1,865	0,067
130	-2,137	0,066	-1,563	0,026	-1,989	0,024
140	-2,382	0,077	-1,700	0,024	-2,182	0,023
150	-2,853	0,111	-1,885	0,096	-2,409	0,039
Mittelwert		0,069		0,053		0,037
Minimum	-2,9	0,037	-1,9	0,024	-2,4	0,023
Maximum	-1,6	0,111	-1,3	0,096	-1,5	0,067

A3 Übersicht über Hersteller und Typen von Rohranlegethermometern

Tab. A23: Übersicht über Hersteller und Typen von Rohranlegethermometern, teilweise aus [114]

Hersteller mit Anschrift	Typ	Rohrdurchmesser in mm	Sensorelement	Messbereichsanfang/-ende in °C	Messabweichung	Wärmeleitpaste erforderlich
A+S Sensortechnik GmbH Grünstraße 32a 40667 Meerbusch-Büderich	auf Anfrage	k. A.	Pt100, Pt1000, NTC	-60 500	k. A.	k. A.
ABB Automation Products GmbH Vertrieb Instrumentation Borsigstr. 2 63755 Alzenau	TSP341-N	Spannschelle: 40 ... 2500	Pt100, 3-Leiter, Klasse A	-40 400	vergleichbar mit invasiven Thermometern	k. A.
AFRISO-EURO-INDEX GmbH Lindenstr. 20 74363 Güglingen	RTS	25 ... 100	Pt100, 4-Leiter, Klasse B	0 150	k. A.	k. A.
B+B Thermo-Technik GmbH Heinrich-Hertz-Str. 4 78166 Donaueschingen	0627 0774-100	28	Pt100, 2-Leiter, Klasse B	-10 105	k. A.	nein
Bioengineering AG Sagenrainstrasse 7 CH-8636 Wald	Rohr-Pt100	1/4" ... 2"	Pt100, 3-Leiter	k. A. 150	k. A.	k. A.
Danfoss GmbH Heating Segment Carl-Legien-Str. 8 63073 Offenbach	ESMC	Spannband: 15 ... 65	Pt1000, 2-Leiter	0 100	k. A.	k. A.
Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH Turnhallenweg 5a 08297 Zwönitz	RF	30 ... 56	Pt100, 2-Leiter, Klasse B	-50 105	k. A.	nein
electrotherm Gesellschaft für Sensorik und thermische Meßtechnik mbH Gewerbepark 6 98716 Geraberg	K11W	Spannband: 20 ... 100	(Dual-) Pt100, 4-Leiter, Klasse A	k. A. k. A.	k. A.	k. A.
Emerson Process Management GmbH & Co. OHG Rheinische Str. 2 42781 Haan	Rosemount 0085 mit 3144P	Rohrklemme: DN15 ... 48"	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	-50 300	k. A.	k. A.
Endress+Hauser Wetzler GmbH + Co. KG Obere Wank 1 87484 Nesselwang	ZGT4	8 ... 50	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	-50 150	k. A.	nein

Hersteller mit Anschrift	Typ	Rohrdurchmesser in mm	Sensorelement	Messbereichsanfang/-ende in °C		Messabweichung	Wärmeleitpaste erforderlich
Eugen Schweitzer Mess- und Regeltechnik e.K. Badstraße 7 81379 München	k. A.	angepasst an Rohr: 6 ... 80	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	-50	140	k. A.	nein
GHM Messtechnik GmbH Schloßstraße 6 88453 Erolzheim	GRO 200	k. A.	Pt100, Klasse B Pt1000 TE Typ K, Klasse 1	-50	200	k. A.	empfohlen
	7122	16 ... 130	Pt100, Klasse B	k. A.	250	k. A.	k. A.
	GTL 72x	12 ... 19 20 ... 33 34 ... 53 60 ... 90	Pt100, 3-Leiter	-20	160	Genauigkeit ohne Wärmeleitpaste/ +Rohrwandkorrektur: ≤ 2,5 % v. E./ 0,6 % v. E. mit Wärmeleitpaste/ +Rohrwandkorrektur: ≤ 1 % v. E./ 0,2 % v. E.	ja/nein
H. Heinz Meßwiderstände GmbH Goethestraße 16 98716 Elgersburg	W05	k. A.	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Honeywell AG Heinrich-Hertz-Straße 40 40699 Erkrath	T7414A1008	Spannband: max. 110	Pt1000, Klasse B	0	110	k. A.	k. A.
Industrie-Elektronik Hofmann & Heim GmbH Im Auchttert 34 73119 Zell unter Aichelberg	FTA	max 2"	Pt100, 2-Leiter	-30	120	k. A.	ja
JUMO GmbH & Co. KG Moritz-Juchheim-Str. 1 36039 Fulda	902550	Spannband: ≤ 100	Standard: Pt100, 2-Leiter, Klasse A Sonderanfertigung: Pt500, Pt1000, 2/3-Leiter, Klasse A/AA	-50	260	k. A.	ja

Hersteller mit Anschrift	Typ	Rohrdurchmesser in mm	Sensorelement	Messbereichsanfang/-ende in °C		Messabweichung	Wärmeleitpaste erforderlich
KOBOLD Messring GmbH Nordring 22-24 65719 Hofheim am Taunus	TWA	Spannband, Schlauchbinder	Pt100, 2-Leiter, Klasse B	-20	260	k. A.	empfohlen
LABOM Mess- und Regeltechnik GmbH Im Gewerbepark 13 27798 Hude	GA261	4 ... 17,2 4 ... 57 100 ... 300	Pt100, 3-Leiter, Klasse A	-40	150	Reproduzierbarkeit: 0,1 K, max. 0,2 K 100 °C ... 150 °C: ($T_U - T_M$) · 0,01	ja
Negele Industrieelektronik GmbH & Co.KG Raiffeisenweg 7 87743 Egg a. d. Günz	TFP-RK	10 ... 28	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	-30	150	k. A.	ja
Oventrop GmbH & Co. KG Paul-Oventrop-Str. 1 59939 Olsberg	1389051	k. A.	Pt1000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
S+S Regeltechnik GmbH Pirnaer Straße 20 90411 Nürnberg	ALTM-1 ALTM-2 ALTF-02 ALTF-1 ALTF-2	13 ... 92 (1/4" ... 3") 300	Pt100, Pt1000, Klasse B, NI1000, LM235Z, NTC 2-, 3-, 4-Leiter	-100	750	0,1 ... 0,4 K	optional
Sensonic ApS Storkevang 10 DK-3450 Allerød	TMPT100A	min. 4	Pt100, 4-Leiter, Klasse A	-40	180	($T_U - T_M$) · 0,03	ja
Sensorox GmbH & Co. KG Obere Wiesen 4 78166 Donaueschingen	TP-GRA-PT1000	k. A.	Pt100, 2-Leiter, Klasse B Pt1000 NTC etc.	-50	90	k. A.	k. A.
Siemens AG Industry SectorSensors and Communication 76181 Karlsruhe	SITRANS T 7MC8016	angepasst an Rohr: 4 ... 57 Spannband: 10 ... 57 8 ... 220	Pt100, 3-Leiter, Klasse A	-20	150	k. A.	ja
SIKA Dr. Siebert und Kühn GmbH & Co. KG Struthweg 7-9 34260 Kaufungen	WRO	Spannband: 15 ... 210	Standard: Pt100, 3-Leiter, Klasse B Sonderanfertigung: Klasse A	k. A.	200	k. A.	k. A.

Hersteller mit Anschrift	Typ	Rohrdurchmesser in mm	Sensorelement	Messbereichs-anfang/-ende in °C	Messabweichung	Wärmeleitpaste erforderlich
SONTEC GmbH Am Wasserfall 6 57368 Lennestadt	TR4TP-1001 TF3-1000 TR4-1000 TR4-1001 TF5.5-1000 TR6-1000		Pt100, Pt1000, Klasse A, B, NTC 10K	-40 180	k. A.	k. A.
Stevanovic Elektrotechnik GmbH Hohenbuckstr. 5 90425 Nürnberg	RAF	1/2" 3/4" 1"	Pt100, 2-Leiter, Klasse B Pt1000, 2-Leiter, Klasse B	-50 400	k. A.	k. A.
Temperaturmeß- technik Geraberg GmbH Heydaer Straße 39 98693 Martinroda	WA 12 WA 13 WA 14	k. A.	Pt100	0 200	k. A.	k. A.
Testo AG Testo-Straße 1 79853 Lenzkirch	Rohran- legefühler TE Typ K	5 ... 65	TE Typ K, Klasse 2	-60 130	Genauigkeit: ±2.5 °C	k. A.
Thermokon Sensortechnik GmbH Platanenweg 1 35756 Mittenaar- Offenbach	VFG54 AF25 PR25	Spannband: 2" oder bis 900 mm	PT100, PT1000, NI1000, NI1000TK5 000, LM235Z, NTCxx, PTCxx Standard: 2-Leiter optional: 3- 4-Leiter	-50 160	±1 % v. M. oder ±0,5 K	empfohlen
TE Connectivity Sensors Germany GmbH Hauert 13 44227 Dortmund	IH-492	k. A.	NTC	-40 105	k. A.	k. A.
Chauvin Arnoux GmbH Ohmstraße 1 77694 Kehl / Rhein	SKxx	-	TE, Klasse 2	-50 200	k. A.	k. A.
TDK Europe GmbH St.-Martin-Straße 53 81669 München PF 80 17 09 81617 München	T120	13,5 15 18 19 22	NTC	-55 100	±3,6 %	k. A.
WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG Alexander-Wiegand- Straße 30 63911 Klingenberg	TR50-Q	Spannband: 11 ... 158	Pt100, 4-Leiter, Klasse AA	-50 250	k. A.	k. A.

A4 Thesen

- Für den Anwender von Rohranlegethermometern ergibt sich bisher ein unbefriedigendes Bild, mit welchen Messabweichungen sowie Messunsicherheiten im realen Anwendungsfall zu rechnen ist.
- Existierende Normen und Richtlinien bieten hierzu nur Anhaltspunkte zur Ermittlung von charakterisierenden Kenngrößen von Rohranlegethermometern.
- Mit Hilfe des hier vorgestellten Prüfstandes auf Basis von Sattedampf wird eine reproduzierbare und universell einsetzbare Messung von Rohranlegethermometern bis zu deren typischer oberer Einsatztemperatur ermöglicht.
- Die Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage eines Rohranlegethermometers an ein Rohr wurde bislang wenig betrachtet, stellt aber eine wesentliche Einflussgröße auf das Messergebnis dar.
- Selbst kleinere Strömungsgeschwindigkeiten durch erzwungene Konvektion in der Umgebung eines Rohranlegethermometers können zu einer deutlichen Erhöhung der Messabweichung führen.
- Mittels thermischer Isolierung eines Rohranlegethermometers und angrenzender Rohrstücke kann jedoch eine signifikante Reduzierung der Messabweichung erfolgen.
- Der Einsatz von gut wärmeleitenden Materialien (z. B. Wärmeleitpaste) zur thermischen Kontaktierung eines Rohranlegetemperaturfühlers an ein Rohr ist gegenwärtig unabdingbar.
- Rohranlegethermometer beeinflussen zwar nicht die Strömung des zu messenden Mediums, wohl aber die Strömung die Messergebnisse der Rohranlegethermometer.
- Es wurde nachgewiesen, dass Prüfstände auf Basis von Wasser und Sattedampf sehr gut geeignet sind, um Rohranlegethermometer über einen weiten Einsatztemperaturbereich miteinander vergleichen und bewerten zu können.
- Die Messung mit Rohranlegethermometern setzt eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Medium, Rohr, Thermometer, thermischen Kontaktwiderstand zwischen Rohr und Temperaturfühler sowie Umgebung, voraus.
- Die Grundlage für ein verbessertes Verständnis von Rohranlegethermometern wurde geschaffen.

A5 Selbstständigkeitserklärung

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung der TU Ilmenau – Allgemeine Bestimmungen.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich geholfen:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich: Hinweise und Verbesserungsvorschläge, unentgeltlich
2. Dr.-Ing. Marc Schalles: Korrekturlesen und Hinweise, unentgeltlich
3. Dipl.-Lehrerin Elke Pietge: Korrekturlesen (Rechtschreibung/Grammatik), unentgeltlich
4. Dipl.-Ing. Helge Mammen: Durchführung und Messdatenauswertung der Vergleichskalibrierungen, unentgeltlich
5. Dipl.-Ing. Heike Schwanbeck: Patentrecherche, unentgeltlich

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Arnstadt, den 12.11.2018